

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ

**КАФЕДРА СИСТЕМНОГО ПРОГРАМУВАННЯ І
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

«На правах рукопису»
УДК 004.77

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри СПСКС

_____ В.П.Тарасенко
(підпис)
“ ” _____ 2018р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(Комп'ютерні системи та компоненти)

на тему: Методи балансування навантаження на модулі мережі LTE шляхом
міжчастотного хендоверу

Виконав: студент II курсу, групи _КВ-61м

Багінський Євгеній Сергійович _____
(підпис)

Науковий керівник доцент каф. СПіСКС, к.т.н., доцент Щербина О.А. _____
(підпис)

Рецензент професор каф. ОТ, д.т.н., проф. _____
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет прикладної математики

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(Комп'ютерні системи та компоненти)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СПСКС

_____ В.П.Тарасенко
(підпис)

« ____ » _____ 2018р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Багінському Євгенію Сергійовичу

1. Тема дисертації Методи балансування навантаження на модулі мережі LTE шляхом міжчастотного хендоверу, науковий керівник дисертації доцент кафедри СПіСКС, к.т.н., доцент Щербина О.А., затверджені наказом по університету від «22» березня 2018 р. №986-с
2. Термін подання студентом дисертації 11 травня 2018 р.
3. Об'єкт дослідження мережа LTE, особливості її архітектури, впровадження та балансування навантаження
4. Предмет дослідження методи балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - проаналізувати способи балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE;
 - показати недоліки існуючих способів балансування навантаження на модулі мережі LTE;
 - запропонувати модифікований спосіб балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE, який відрізняється від існуючих наявністю міжчастотного хендоверу
6. Перелік ілюстративного матеріалу
 - Огляд мобільних мереж.
 - Запропонований алгоритм прийому вхідних сигналів.

- Процес аналізу вхідних запитів.
- Пропускна спроможність та прийнята потужність за різними схемами модуляції та кодування.
- Отримана потужність по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій.
- Тестування LTE 2600МГц.

7. Перелік публікацій

- X наукова конференція магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2018 (Київ, 21-23 березня 2018 р.);
- VIII наукова конференція магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2016 (Київ, 20-22 квітня 2016 р.);
- Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2018. – №5.
- IX міжнародна наукова-практична конференція 24-25 червня 2016р. «Сучасна наука: теорія і практика».

8. Дата видачі завдання 5 вересня 2016 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Вивчення літератури за тематикою проекту	10.10.2016	
	Розроблення та узгодження технічного завдання	17.12.2016	
	Аналіз існуючих рішень	10.01.2017	
	Підготовка матеріалів першого розділу магістерської дисертації	15.02.2017	
	Підготовка матеріалів другого розділу магістерської дисертації	30.04.2017	
	Підготовка матеріалів третього розділу магістерської дисертації	20.09.2017	
	Підготовка графічної частини дипломного проекту	20.02.2018	
	Оформлення документації дипломного проекту	23.04.2018	
	Попередній розгляд магістерської дисертації на кафедрі	26.04.2018	

Студент

(підпис)

Є. С. Багінський

Науковий керівник дисертації

(підпис)

О. А. Щербина

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Очікується, що до 2021 року кількість людей, які будуть користуватися мобільними телефонами наблизиться до 5,5 млрд. Такі дані наводяться в черговому випуску звіту Cisco «Наочний індекс розвитку мережевих технологій: глобальний прогноз по мобільному трафіку на період 2016-2021 рр.». Такі фактори, як впевнене зростання числа користувачів мобільного зв'язку, смартфонів, мобільного відео, підключень Інтернету речей (Internet of Things, IoT), а також зростання швидкостей передачі даних і споживання мобільного відео в найближчі п'ять років призведуть до семикратного збільшення мобільного трафіку. Це в свою чергу загострює проблему балансування навантаження зокрема в мережах LTE.

Об'єктом дослідження мережа LTE, особливості її архітектури, впровадження та балансування навантаження.

Предметом дослідження є методи балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE.

Методи дослідження — методи математичної статистики для аналізу балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE.

Мета роботи: розробка та оцінка ефективності механізму балансування навантаження на базову станцію, що використовує міжчастотний хендовер в мережах LTE з урахуванням кількох спільних розташувань діапазонів частот, що розгортаються.

Наукова новизна полягає в наступному:

1. Проаналізовано методи балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE та показані, що існуючі методи не враховують балансування навантаження в умовах декількох смуг частот.
2. Запропоновано модифікований метод балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE, який відрізняється від існуючих наявністю міжчастотного хендоверу, що дає можливість використовувати механізм на декількох частотах LTE.

Практична цінність одержаних в роботі результатів полягає в тому, що запропонований метод балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE дає змогу використовувати декілька частотних смуг мобільної мережі, що покращує якість надання послуг мобільних мереж з точки зору часу відповіді, кількості відхилених викликів та вимог QoS.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи були представлені та обговорювались на:

- VIII науковій конференції магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2016 (Київ, 20-22 квітня 2016 р.);
- X науковій конференції магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2018 (Київ, 21-23 березня 2018 р.).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 4 наукові праці, з них 2 статті та 2 тези конференції.

Структура та обсяг роботи. Магістерська дисертація складається з вступу, трьох розділів та висновків.

У *вступі* подано загальну характеристику роботи, зроблено оцінку сучасного стану проблеми, обґрунтовано актуальність напрямку досліджень, сформульовано мету і задачі досліджень, показано наукову новизну отриманих результатів і практичну цінність роботи, наведено відомості про апробацію результатів.

У *першому розділі* розглянуто теоретичні відомості по заданій темі, а також проведений аналіз, який дає змогу визначити основні переваги та недоліки існуючих методів балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE.

У *другому розділі* наведено аналіз існуючих методів балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE та запропонований модифікований метод з використанням міжчастотного хендоверу.

У *третьому розділі* надані експериментальні результати з балансування навантаження на базову станцію для мереж LTE з використанням міжчастотного хендоверу та результатів тестів мережі LTE в місті Київ.

У *висновках* представлені результати проведеної роботи.

Робота представлена на 110 аркушах, містить 53 рисунка, 8 таблиць та список використаних літературних джерел з 29 найменувань.

Ключові слова: LTE, балансування навантаження, хендовер, частотні смуги, пропускна спроможність.

ABSTRACT

Actuality of subject. It is expected that by 2021, the number of people who will use mobile phones will be close to 5.5 billion. Such data are presented in the next issue of the Cisco Report "Visual Network Technology Development Index: Global Outlook for Mobile Traffic for 2016-2021." Factors such as the steady increase of mobile users, smartphones, mobile video, Internet of Things (IoT), as well as the growth of data rates and the consumption of mobile video in the next five years will lead to a sevenfold increase in mobile traffic. This, in turn, exacerbates the problem of load balancing in particular in LTE networks.

The object of research is the LTE network, the peculiarities of its architecture, the implementation and balancing of the load.

The subject of the study is methods for balancing load on the base station for LTE networks.

Methods of research - methods of mathematical statistics for analysis of load balancing for the base station for LTE networks.

The purpose of the work: To develop and evaluate the efficiency of the load balancing mechanism for the base station using the inter-frequency handover in LTE networks, taking into account several common location of deployable frequency bands.

The scientific novelty is as follows:

1. The methods of load balancing of the base station for LTE networks are analyzed and it is shown that the existing methods do not take into account load balancing in the conditions of several frequency bands.
2. The modified load balancing method for the base station for LTE networks is proposed, which differs from the existing inter-frequency handover, which makes it possible to use the mechanism on several LTE frequencies.

The practical value of the results obtained in the work is that the proposed method for balancing load on the base station for LTE networks allows the use of several frequency bands of the mobile network, which improves the quality of providing mobile network services in terms of response time, the number of rejected calls and QoS requirements.

Approbation of the work. The main provisions and results of the work were presented and discussed at:

- VIIIth International Conference of Masters and Postgraduate Students "Applied Mathematics and Computing" PMK-2016 (Kyiv, April 20-22, 2016);
- Xth International Conference of Masters and Postgraduate Students "Applied Mathematics and Computing" PMK-2018 (Kyiv, March 21-23, 2018).

Publications According to the results of the study 2 scientific works were published, including 1 article and 1 thesis of the conference.

Structure and scope of work. The master's thesis consists of an introduction, three sections and conclusions.

The introduction gives a general description of the work, assesses the current state of the problem, substantiates the relevance of the research direction, formulates the purpose and objectives of the research, shows the scientific novelty of the results obtained and the practical value of the work, provides information on the approbation of the results.

The first section deals with theoretical information on a given topic, as well as an analysis that allows to determine the main advantages and disadvantages of existing load balancing methods for the base station for LTE networks.

The second section analyzes existing load balancing methods for the base station for LTE networks and proposes a modified method using the inter-frequency handover.

The third section provides experimental results for balancing load on the base station for LTE networks using an inter-frequency handler and LTE network test results in Kyiv.

The conclusions are the results of the work.

The work is presented on 110 Sheets, contains 53 pictures, 8 tables and a list of used literary sources from 29 titles.

Keywords: LTE, load balancing, handover, frequency bands, bandwidth.

РЕФЕРАТ

Актуальность темы. Ожидается, что до 2021 года количество людей, которые будут пользоваться мобильными телефонами приблизиться до 5,5 млрд. Такие данные приводятся в очередном выпуске отчета Cisco «Наглядный индекс развития сетевых технологий: глобальный прогноз мобильного трафика на период 2016-2021 гг.». Такие факторы, как уверенный рост количества пользователей мобильной связи, смартфонов, мобильного видео, подключение Интернета вещей (Internet of Things, IoT), а также рост скоростей передачи данных и использование мобильного видео в ближайшие пять лет приведут к семикратному увеличению мобильного трафика. Это в свою очередь усугубляет проблему балансировки нагрузки, в частности, в сетях LTE.

Объектом исследования есть сеть LTE, особенности ее архитектуры и внедрение, балансировка нагрузки.

Предметом исследования есть методы балансировки нагрузки на базовую станцию для сети LTE.

Методы исследования – методы математической статистики для анализа балансировки нагрузки на базовую станцию для сети LTE.

Цель работы: разработка и оценка эффективности механизма балансировки нагрузки на базовую станцию, которая включает межчастотный хендовер в сетях LTE с учетом нескольких общих распределений диапазонов частот, которые разворачиваются.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Проанализировано методы балансировки нагрузки на базовую станцию для сетей LTE и показано, что существующие методы не учитывают балансировку нагрузки в условиях использования нескольких полос частот.
2. Предложено модифицированный метод балансировки нагрузки на базовую станцию для сетей LTE, который отличается от существующих наличием межчастотного хендовера, что дает возможность использовать механизм на нескольких частотах LTE.

Практическая ценность полученных в работе результатов состоит в том, что предложенный метод балансировки нагрузки на базовую станцию для сетей LTE предоставляет возможность использовать несколько частотных полос мобильной сети, что улучшает качество предоставления услуг мобильных сетей с точки зрения ответа, количества отклоненных вызовов та требований QoS.

Апробация работы. Основные аспекты и результаты работы были предоставлены и обсуждались на:

- VIII научной конференции магистрантов и аспирантов «Прикладная математика и компьютеринг» ПМК-2016 (Киев, 20-22 апреля 2016 г.).
- X научной конференции магистрантов и аспирантов «Прикладная математика и компьютеринг» ПМК-2018 (Киев, 21-23 марта 2018 г.).

Публикации. За результатами исследования опубликованы 4 научные работы, из них 2 статьи и 2 тезы конференции.

Структура и объем работы. Магистерская диссертация состоит с вступления, трех разделов и выводов.

Во *введении* подано общую характеристику работы, сделано оценку современного состояния проблемы, обоснована актуальность направления исследований, сформулировано цель и задания исследований, показано научную новизну полученных результатов и практическую ценность работы, приведено ведомости об апробации результатов.

В *первом разделе* рассмотрены теоретические ведомости по данной теме, а также проведенный анализ, который предоставляет возможность обозначить основные преимущества и недостатки существующих методов балансировки нагрузки на базовую станцию для сетей LTE.

Во *втором разделе* приведено анализ существующих методов балансировки нагрузки на базовую станцию для сетей LTE и предложен модифицированный метод с использованием межчастотного хендвера.

В *третьем разделе* предоставлены экспериментальные результаты с балансировки нагрузки на базовую станцию для сетей LTE с использованием межчастотного хендвера и результатов тестов сети LTE в городе Киев.

В *выводах* предоставлены результаты проведенной работы.

Работа предоставлена на 110 страницах, включает 53 рисунка, 8 таблиц и список использованных литературных источников с 29 наименованиями.

Ключевые слова: LTE, балансировка нагрузки, хендовер, частотные полосы, пропускная способность.

ЗМІСТ

Список аббревіатур, термінів та скорочень.....	4
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ	11
1.1 Огляд стільникових мереж.....	11
1.2 Архітектура мережі.....	17
1.3 Радіо-інтерфейс	20
1.4 Сервіси та додатки	26
1.5 Міжчастотний хендовер	30
Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2. ОПИС МЕТОДІВ ТА МОДЕЛІ	36
2.1 Аналіз політик управління	36
2.2 Початковий огляд методів	42
2.3 Опис алгоритму міжчастотного хендовера	48
2.4 Опис системи моделювання.....	51
2.5 Оцінка розробленої моделі.....	53
Висновки до розділу 2	59
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	60
3.1 Опис сценаріїв для тестування в місті Київ	60
3.2 Аналіз при високому навантаженні	66
3.3 Аналіз при низькому навантаженні	81
3.4. Результати тестування в місті Київ	97

Висновки до розділу 3	102
ВИСНОВКИ.....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104
ДОДАТКИ.....	108
Додаток 1. Копії графічних матеріалів	109
- Огляд мобільних мереж.	
- Запропонований алгоритм прийому вхідних сигналів.	
- Процес аналізу вхідних запитів.	
- Пропускна спроможність та прийнята потужність за різними схемами модуляції та кодування.	
- Отримана потужність по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій.	
- Тестування LTE 2600 МГц.	
Додаток 2. Публікації за темою магістерської дисертації	110
- VIII наукова конференція магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2016 (Київ, 20-22 квітня 2016 р.).	
- X наукова конференція магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2018 (Київ, 21-23 березня 2018 р.).	
- IX міжнародна наукова-практична конференція 24-25 червня 2016р. «Сучасна наука: теорія і практика».	
- Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2018. – №5.	

Список аббревіатур, термінів та скорочень

2G	(Second Generation) – Друге Покоління
3G	(Third Generation) – Третє Покоління
3GPP	(Third Generation Partnership Project) – Проект Партнерства Третього Покоління
4G	(Fourth Generation) – Четверте Покоління
AMBR	(Aggregated Maximum Bit Rate) – Сукупна Максимальна Швидкість Передачі даних
ARP	(Allocation and Retention Priority) – Пріоритет Розподілу та Збереження
BS	(Base Station) – Базова Станція
CA	(Carrier Aggregation) – Агрегація носіїв
CAC	(Call Admission Control) – Контроль Находження Викликів
CC	(Component Carrier) – Носій Компонентів
CCCH	(Common Control Channel) – Загальний Контроль Каналу
CP	(Cyclic Prefix) – Циклічний Префікс
DCCH	(Dedicated Control Channels) – Виділений Контроль Каналу
DL	(Down Link) – Вхідна Лінія зв'язку
EDGE	(Enhanced Data Rates for GSM Evolution) – Підвищена Швидкість Передачі Даних для GSM Evolution
EPC	(Evolved Packet Core) – Розвинуте Пакетне Ядро
EPS	(Evolved Packet System) – Розвинена Пакетна Система
ETSI	(European Telecommunications Standards Institut) – Європейський Інститут Стандартів Телекомунікацій
E-UTRAN	(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) – Розвинена Універсальна Мережа Наземного Радіодоступу
eNB	(Evolved NodeB) – Розвинений Базовий Вузол
FDD	(Frequency Division Duplex) – Дуплексний Частотний Розподіл
FST1	(Frame Structure Type 1) – Структурна схема типу 1

FST2	(Frame Structure Type 2) – Структурна схема типу 2
FTP	(File Transfer Protocol) – Протокол передачі файлів
GBR	(Guaranteed Bit Rate) – Гарантована Швидкість Передачі даних
GERAN	(GSM/EDGE Radio Access Network) – Мережа Радіодоступу GSM / EDGE
GPRS	(General Packet Radio Service) – Основний Пакет Послуг Радіозв'язку
GSM	(Global System for Mobile Communications) – Глобальна Система Мобільного Зв'язку
GTP	(GPRS Tunnelling Protocol) – Протокол GPRS-тунелювання
HO	(Handover) – Хендовер
HSDPA	(High Speed Down Link Packet data Access) – Високошвидкісний Доступ Низхідної Лінії зв'язку до Пакетних Даних
HSPA	(High Speed Packet data Access) – Високошвидкісний Доступ до Пакетних Даних
HSS	(Home Subscription Server) – Сервер домашньої підписки
HSUPA	(High Speed Up Link Packet data Access) - Високошвидкісний Доступ Висхідної Лінії зв'язку до Пакетних Даних
IMT-A	(International Mobile Telecommunications Advanced) – Розширена Міжнародна Мобільна Телекомунікація
IP	(Internet Protocol) – Інтернет-протокол
ISI	(Inter-Symbol Interference) – Міжсимвольні Перешкоди
LB	(Load Balancing) – Балансування Навантаження
LoS	(Line-of-Sight) – Лінійне З'єднання
LTE	(Long Term Evolution) – Довготривала Еволюція
LTE-A	(Long Term Evolution Advanced) – Розширена Довготривала Еволюція

MAC	(Medium Access Control) – Контроль Доступу до Середовища
MBR	(Maximum Bit Rate) – Максимальна Швидкість Передачі даних
MIMO	(Multiple Input Multiple Output) – Багатоканальний Ввід/Вивід
MM	Mobility Management) - Управління мобільністю
MME	(Mobility Management Entity) – Суб’єкт Управління Мобільністю
NLoS	(Non Line-of-Sight) – Нелінійне З’днання
OFDMA	(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – Багатофункціональний Доступ до Ортогонального Частотного Розділу
P-GW	(Packet Data Network Gateway) – Мережевий Шлюз Пакетної Передачі Даних
PAR	(Peak-to-Average Ratio) – Найвищий Середній Показник
PBCH	(Physical Broadcast Channel) – Фізичний Трансляційний Канал
PCC	(Primary Component Carrier) – Первинний Носій Компонентів
PCell	(Primary Cell) – Первинна Комірка
PCRF	(Policy and Charging Resource Function) – Політика і Ресурсна Функція Завантаження
PCEF	(Policy and Charging Enforcement Function) - Функція Завантаження
PDN	(Packet Data Network) – Мережа Пакетних Даних
PDSCH	(Physical Downlink Shared Channel) – Фізичний Вхідний Загальний Канал
PDU	(Protocol Data Unit) – Блок Протоколу Даних
PLMN	(Public Land Mobile Network) – Громадська Наземна Мобільна Мережа
PMCH	(Physical Multicast Channel) – Фізичний Багатоадресний Канал
PRACH	(Physical Random Access Channel) – Фізичний Канал Випадкового Доступу

PS	(Packet Scheduling) – Планування Пакетів
PUSCH	(Physical Uplink Shared Channel) – Фізичний Вихідний Загальний Канал
QCI	(Quality of Service Class Identifier) – Якість Ідентифікатора Класу Обслуговування
QoS	(Quality of Service) – Якість Обслуговування
RAT	(Radio Access Technology) - Технологія радіодоступу
RB	(Resource Block) – Блок ресурсів
RE	(Resource Element) – Елемент Ресурсу
RLC	(Radio Link Control) – Контроль Радіозв'язку
RRC	(Radio Resource Control) – Контроль Радіоресурсів
RRM	(Radio Resource Management) – Радіоресурсне управління
RSRP	(Reference Symbol Received Power) – Довідковий Показник Отриманої Потужності
RSRQ	(Reference Symbol Received Quality) – Довідковий Показник Отриманої Якості
S-GW	(Serving Gateway) – Сервісний Шлюз
SAE	(System Architecture Evolution) – Еволюція Системи Архітектури
SC-FDMA	(Single Carrier Frequency Division Multiple Access) – Багатофункціональний Доступ до Одиного Частотного Розподілу
SCC	(Secondary Component Carrier) – Вторинний Носій Компонентів
SCell	(Secondary Cell) – Вторинна Комірка
SCTP	(Stream Control Transmission Protocol) – Протокол Передачі Потoku
SINR	(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) - Співвідношення Сигнал-Перешкода-плюс-Шум

SMS	(Short Message Service) – Служба Коротких Повідомлень
SNR	(Signal-to-Noise Ratio) – Співвідношення Сигналу до Шуму
TDD	(Time Division Duplex) – Дуплекс з Часовим Розподілом
TDMA	(Time Division Multiple Access) - Багаторазовий Доступ з Часовим Розділенням Каналів
TTI	(Transmission Time Interval) – Інтервал Часу Передачі
UDP	(User Datagram Protocol) – Протокол Датаграми Користувачів
UE	(User Equipment) – Обладнання Користувача
UL	(Up Link) – Вихідна Лінія зв'язку
UMTS	(Universal Mobile Telecommunication System) – Універсальна Мобільна Телекомунікаційна Система
UP	(User Plane) – Площина Користувача
UTRAN	(Universal Terrestrial Radio Access Network) – Універсальна Мережа Наземного Радіодоступу
VoIP	(Voice over IP) – Передача Голосу по IP
WCDMA	(Wideband Code Division Multiple Access) - Широкопasmовий Множинний Доступ із Кодовим Розподілом Каналів

ВСТУП

Люди завжди відчували потребу спілкування з іншою людиною або в межах груп. Ця необхідність призвела до глобального розвитку стільникових мереж, однією з яких є мережа LTE, запуск якої в Україні відбувся весною 2018 року. Очевидні переваги LTE є важливим чинником зростання кількості абонентів телекомунікаційних послуг. Користувачі можуть досягти більш високих швидкостей передавачі даних і ширшого спектру послуг з високим рівнем якості наданих послуг, тому це потребує кращої загальної продуктивності мережі. Збільшення кількості користувачів у мережі вимагає, щоб оператори турбуватися про спроможність системи передавати таку кількість трафіку, одночасно підтримуючи збалансовану завантаженість мережі. Цікавою особливістю E-UTRAN, яка може допомогти в цьому питанні, а саме розгортання декількох несучих частот в одній зоні покриття, і дасть змогу подальшого вивчення міжчастотного хендоверу. 3GPP забезпечує необхідні процедури та вимоги, пов'язані з використанням міжчастотного хендоверу, для забезпечення ефективного використання багаторазових частот.

Відомо, що для кожної несучої частоти виникають різні зони покриття та пропускна спроможність, що призводить до необхідності компромісу між ними і глибоко впливає на користувацький досвід.

Висновки, зроблені в рамках даної роботи, можуть представляти інтерес, головним чином, про те, як використовувати різні частотні діапазони для розподілу навантаження та покращення якості сигналу. Вимірювання, виконані в рамках даної роботи, були зроблені за допомогою додатку ns-3, а аналіз, виконаний у цій роботі, базується на трьох частотних діапазонах.

Результатом даної роботи є модель, розроблена для мереж LTE у міських сценаріях на основі міста Київ, але з урахуванням лише кількох

eNB, де користувачі вимагають послуг мережі в певних випадках і в певній позиції, і пов'язані з заданою пропускнуою спроможністю. Тоді користувачі конкурують за наявні ресурси мережі відповідно до пріоритету послуги, яку вони запитують, і якість їх сигналу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

1.1 Огляд стільникових мереж

Необхідність в спілкуванні разом з турботою про мобільність користувачів на сьогоднішній день призвела до швидкого розвитку мобільного голосового зв'язку за останнє десятиліття. Число абонентів зросло від одного до більше п'ятьох мільярдів у період між 2002 і 2017 роками, [1], так само як і трафік за останні роки. Саме тут найбільш помітна зміна відбувалася з точки зору вимог користувача, як можна побачити на рисунку 1.1. Протягом п'яти років світовий рух змінився з ситуації, коли запит на обидва типи трафіку був збалансований до величезного домінування трафіку даних.

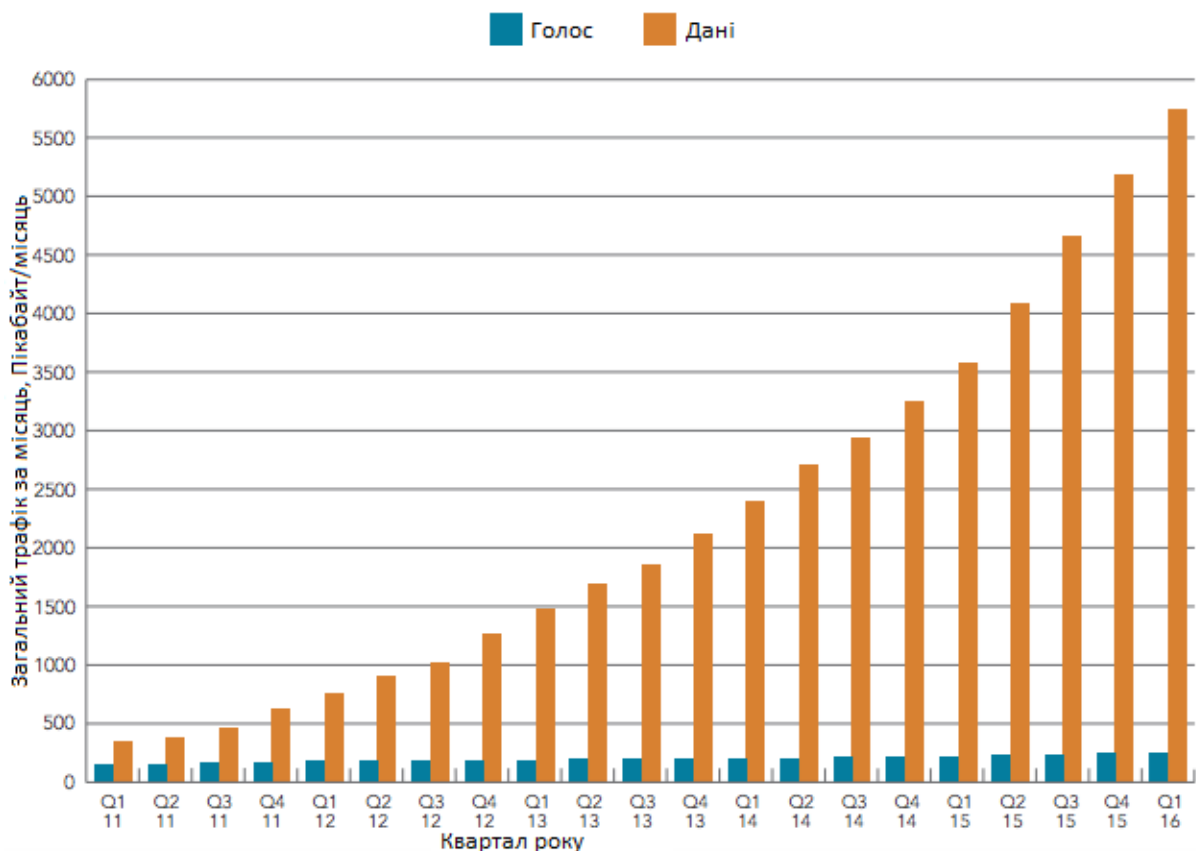


Рисунок 1.1 - Глобальний трафік в мобільних мережах, 2011-2016 роки

Незважаючи на те, що проводові мережі все ще здатні забезпечити найвищу швидкість передачі даних [1], безпроводові мережі постійно розвиваються, щоб утримати темп фіксованих послуг, досягнутих швидкістю передачі даних, оскільки користувачі сподіваються отримати подібну продуктивність з мобільної мережі. Безпроводові технології мають здатність надавати персональний широкосмуговий доступ, незалежно від місцезнаходження користувача, що є його головним активом. Крім того, вони можуть працювати як недороге рішення для широкосмугового доступу, порівняно з новими кабельними установками.

На ранніх етапах головна проблема полягала в тому, щоб мати мобільну мережу, яка несе голосовий трафік. Глобальна система мобільного зв'язку (GSM), як мобільна мережа другого покоління (2G) розроблена Європейським інститутом стандартів телекомунікацій (ETSI), була розроблена для цієї мети, з пізнішими удосконаленнями, що стосуються трафіку даних: покращені тарифи даних для розвитку GSM (EDGE) та загальною послугою пакетного радіозв'язку (GPRS). GPRS був першим кроком для Інтернет-протоколу (IP) на основі пакетного комутованого рішення для мобільних систем. В ньому використовується такий самий метод доступу, багатовимірний доступ до часу (TDMA).

Для розвитку мереж стільникового зв'язку технології був створений проект партнерства третього покоління (3GPP), що включає шість телекомунікаційних стандартів розвитку організацій, відомих як організаційні партнери. Основна увага зосереджена як на зворотній, так і прямій сумісності, коли це можливо, а також на забезпеченні їх учасникам стабільного середовища для роботи зі звітами та специфікаціями, які визначають 3GPP технології. Цей проект включає вивчення радіодоступу, основної транспортної мережі та сервісних можливостей, що дозволяють забезпечувати повні технічні характеристики системи.

Покращення якості зображення та відео призвели до того, що попит на великі обсяги даних і послуги більш високої швидкості зростає і для мобільних систем. Таким чином, були розроблені мобільні мережі третього покоління (3G), такі як Універсальна мобільна телекомунікаційна система (UMTS) у випуску 99 3GPP. Цей випуск був завершений наприкінці 1999 року та передбачав нову технологію доступу з використанням широкосмугового коду багаторазового доступу (WCDMA). IP-адреса призначається тільки після того, як це вимагається користувачем, і він відпускається, коли сесія закінчується.

Постійний запит про підвищення бітових коефіцієнтів та необхідність отримання кращих даних для завантаження послуг призвели до оновлення системи пакетної передачі даних. 3GPP представила п'яту версію високошвидкісної низхідної лінії зв'язку (DL) доступу до пакетних даних (HSDPA) у 2002 р. А також у 2004 р. - випуск шостої версії високошвидкісної висхідної лінії зв'язку (UL). Ці два вдосконалення разом також називаються високошвидкісними пакетами (HSPA), і вона була підвищена для більш високих бітових частот (HSPA+) в 2007 році з релізу 7.

У наступному році Long Term Evolution (LTE) вперше було зазначено в релізі 8, де багатфункціональний доступ до ортогонального частотного розподілу (OFDMA) використовується для частот DL та одиночної несучої частоти розподілу багаторазового доступу (SC-FDMA) для UL. Деякі функції були додані до IP протоколу мережі у версії 9, наприклад, зворотна сумісність з UMTS та загальна поліпшення архітектура.

Для досягнення кращої продуктивності, ніж тієї, яка пропонується існуючими мережами 3GPP на UMTS / HSPA для LTE були визначені різні вимоги, такі як максимальна пропускна спроможність користувачів 100 Мбіт/с в DL і 50 Мбіт/с в UL, що в десять разів більше, ніж у HSPA

випуску 6. Затримка також потребує вдосконалення, щоб покращити роботу користувачів та покращити споживання енергії. Споживання енергії має бути зведено до мінімуму, що дозволяє більше використовувати мультимедійні програми без необхідності постійно заряджати акумулятор обладнання. Що стосується розподілу пропускної спроможності, то передбачається, що LTE буде гнучким до точки дозволу використання менш ніж 1,5 МГц і до 20 МГц.

На рисунку 1.2 ілюструється часовий графік специфікацій 3GPP разом із їх відповідним комерційним розгортання, де кожна дата означає схвалення специфікації.

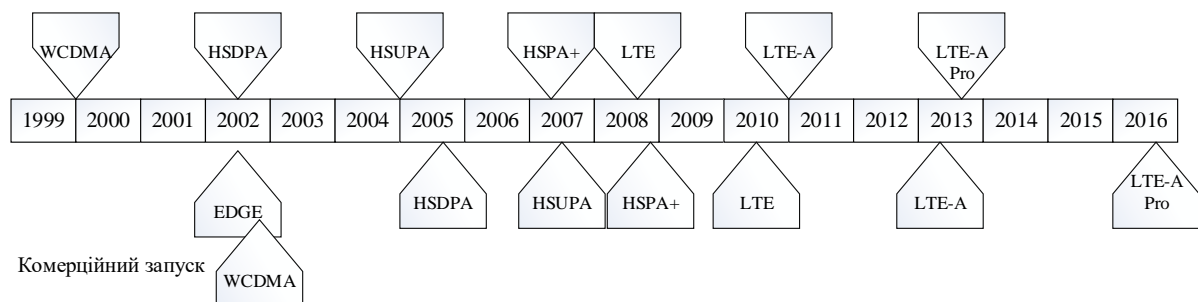
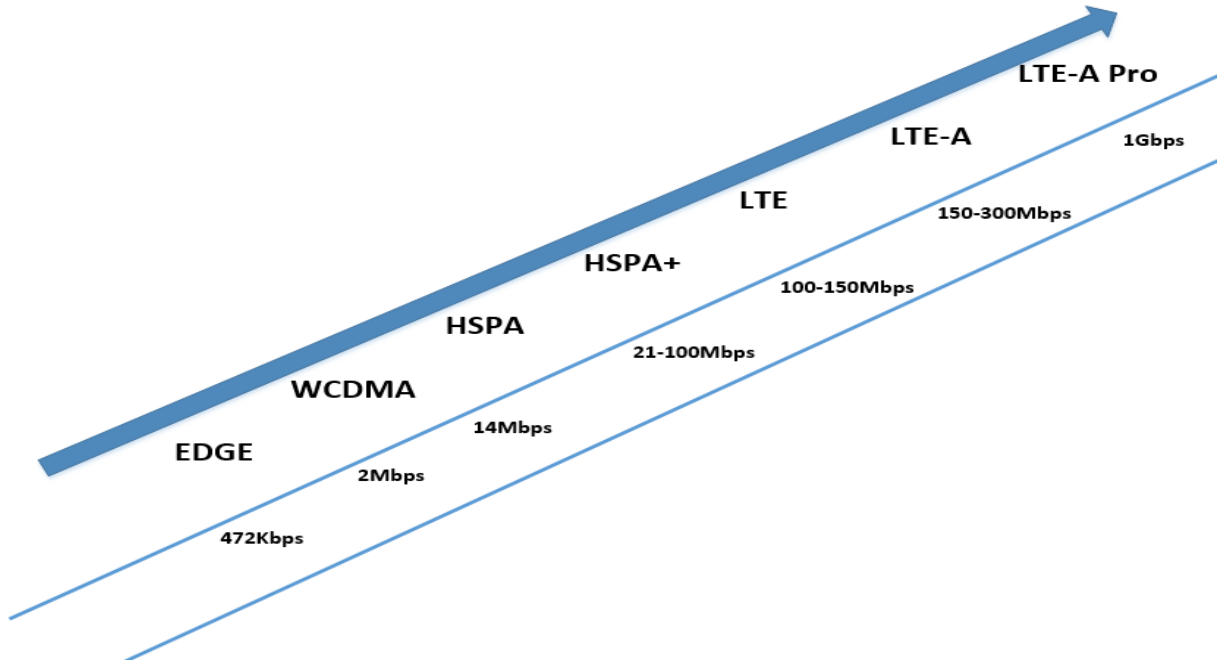


Рисунок 1.2 - Розклад виходу нових версій стандарту 3GPP

Подальше збільшення можливостей LTE було представлено у випуску 10 Long Term Evolution Advanced (LTE-A) у грудні 2010 р., а саме використання розширеного множинного вводу/виводу (MIMO) з метою виконання вимог, випущених International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-A) для мобільної мережі четвертого покоління (4G).

З розробкою та впровадженням кожного нового покоління технологій також поставляється підвищення максимальної пропускної здатності, як показано на рис. 1.3. Крім того, кожна нова 3GPP технологія задумана як розгортання при співіснуванні зі старими. Наприклад, передача дозволів здійснюється від/до LTE навіть якщо користувач підключений або хоче підключитися до мережі GSM або UMTS. Крім того, ці три покоління технологій можуть розділяти деякі мережеві елементи,

наприклад, елементи основної мережі. Окрім того, деякі елементи мережі 3G можна оновити, щоб підтримувати LTE, таким чином, дозволяючи існування платформи, що містить як UMTS / HSPA, так і LTE.



Рисинок 1.3 - Еволюція пікових швидкостей передачі технологій 3GPP

На рисунку 1.4 представлені мережеві рішення від GSM до LTE. У перших двох системах мережа радіодоступу GSM / EDGE (GERAN) та Всесвітня мережа наземного радіодоступу (UTRAN) - це мережі радіодоступу відповідно до систем GSM та UMTS. Розвинена універсальна мережа наземного радіодоступу (E-UTRAN) є мережею радіодоступу, тоді як пакетне ядро (EPC), як випливає з назви, являє собою основну мережу. Разом вони складають Пакетну систему (EPS), яка відповідає за підключення на основі IP. ENodeB (eNB) - базова станція (BS), яка відповідає за всі функції, пов'язані з радіопередачею. Більш докладний опис архітектури мереж LTE та інтерфейсу радіоприймача описаний в розділі 2.

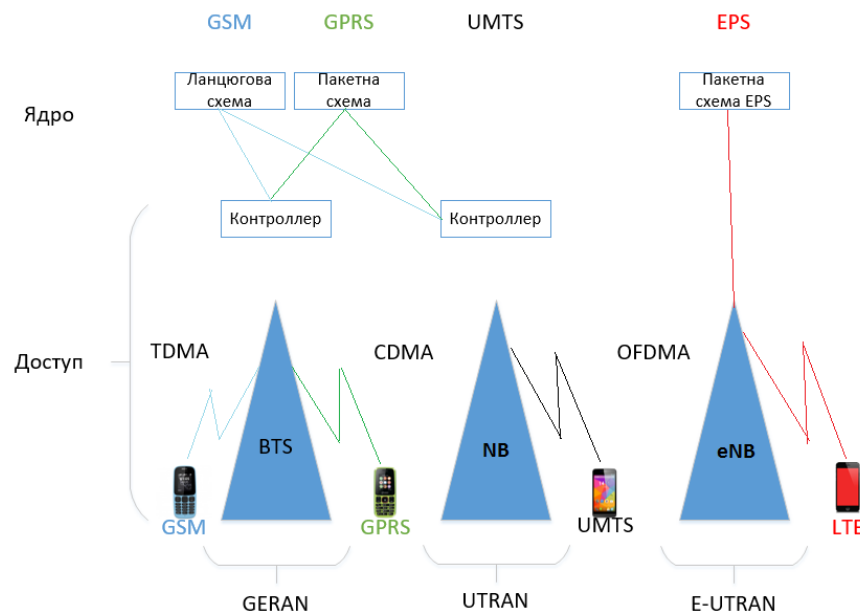


Рисунок 1.4 - Еволюція мережевих рішень від GSM до LTE

Очікується, що загальний обсяг мобільних даних продовжуватиме зростати протягом наступних років. На думку [2], загальний обсяг мобільних даних у 2016 році збільшився на 63%.

Популярність смартфонів в даний час сильно сприяє цим очікуванням, головним чином, завдяки зростанню потреб в більш вимогливих сервісах з точки зору пропускнуєї спроможності та латентності. Ці пристрої становили 89% загального обсягу мобільних даних у 2015 році, що становить 45% від загального числа мобільних пристроїв та з'єднань. До 2021 року очікується, що смартфони будуть представляти понад 50% загальних мобільних пристроїв, що становить 86% світового мобільного трафіку. Як видно з рисунку 1.5, обсяг мобільного трафіку до 2021 року виросте в 7 разів, порівняно з 2016 роком, а саме з 7 до 49 Ексабайт (10^{18} байт) на місяць.

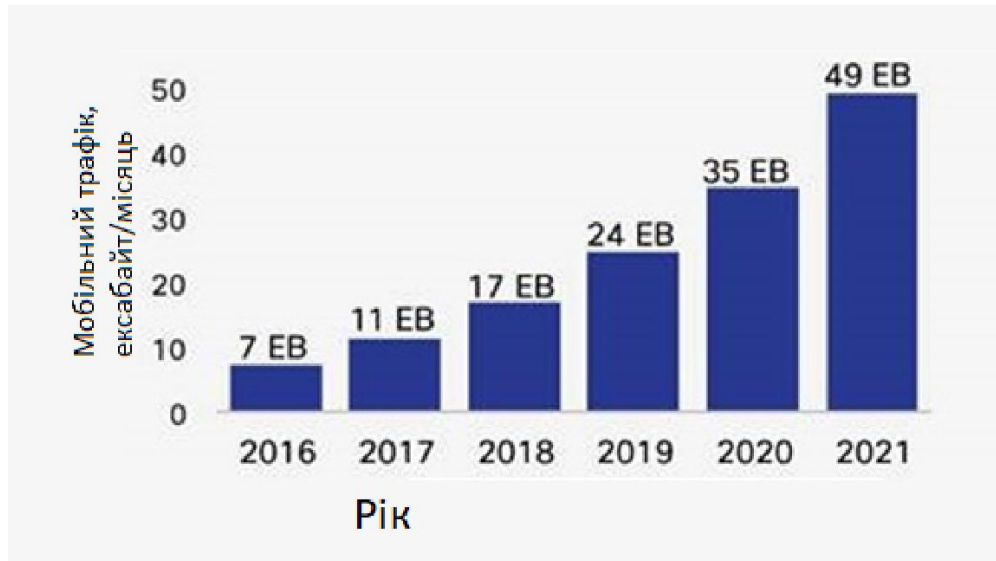


Рисунок 1.5 - Глобальний прогноз мобільного трафіку, 2016-2021

1.2 Архітектура мережі

В даному пункті міститься інформація про архітектуру мережі LTE та LTE-A, її вміст базується на [1,3].

Реалізація архітектури системи 3GPP (SAE) була можлива лише після визначення багатьох аспектів мережі. Архітектура є більш гладкою, що включає менше вузлів, а отже, знижує затримку і покращує продуктивність.

На рисунку 1.6 представлено схему для мережі E-UTRAN, де пунктирна лінія представляє собою з'єднання на панелі керування та повне з'єднання в площині користувача (UP). Структура розділена на чотири основні області: Обладнання користувача (UE), E-UTRAN, EPC та Домен послуг.

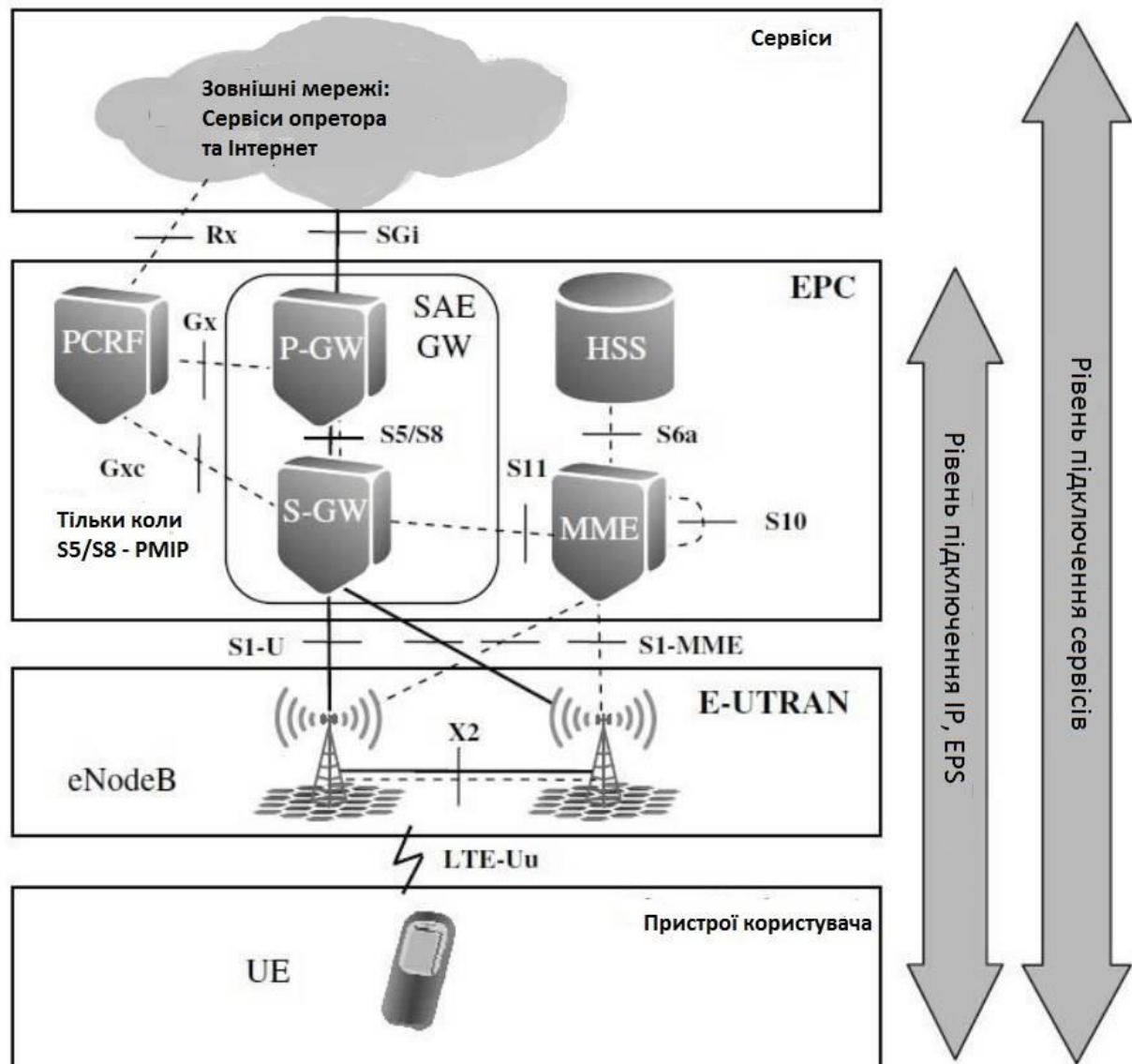


Рисунок 1.6 - Архітектура системи для мережі E-UTRAN

ЕРС разом з E-UTRAN утворює EPS. Функціонально ЕРС несе відповідальність за підтримку зв'язку між мережами доступу, а її основними компонентами є:

- суб'єкт управління мобільністю (MME - Mobility Management Entity). Це центральний елемент управління, який працює тільки в плані управління як основний канал керування між UE та мережею. Він відповідальний за автентифікацію та безпеку UE у мережі, керує профілями підписки UE, і стосується проблем мобільності;

- сервісний шлюз (S-GW - Serving Gateway). Він діє як прив'язка мобільності в UP при передачі між eNB і забезпечує маршрутизацію пакета даних користувачів;

- шлюз мережі пакетної передачі даних (P-GW - Packet Data Network Gateway). Він встановлює зв'язок між EPC і зовнішніми IP-мережами. Також контролює та передає дані по тунелю UP для UL і DL;

- політика та ресурсна функція завантаження (PCRF - Policy and Charging Resource Function). Забезпечує контроль над політикою та визначає неточності в управлінні рішеннями. Працює разом із функцією порушення (PCEF - Policy and Charging Enforcement Function), яка розташована в P-GW, для забезпечення стандартів якості обслуговування (QoS);

- сервер домашньої підписки (HSS - Home Subscription Server). Він реєструє дані підписки користувачів, включаючи відповідні послуги, дозволені з'єднання та зберігає розташування UE в межах відповідного мережевого контрольного вузла.

E-UTRAN - це сукупність eNB, з'єднаних через інтерфейс X2 і підключений до EPC через S1, рис. 1.6. Кожен eNB є точкою завершення всіх протоколів, що відносяться до радіо, та є відповідальним за функцію Control Plane для моніторингу використання радіоресурсів, яка називається Radio Resource Management (RRM). Крім того, він відповідає за управління мобільністю (MM), тобто він оцінює рівень радіосигналу вимірювання, що виконуються як UE, так і самим eNB для цілей передачі даних. Крім того, eNB проводить надходження даних в UP, забезпечуючи безпеку та оптимізацію радіо інтерфейсу та виконує стиснення/декомпресування заголовка IP, щоб уникнути повторення даних передачі.

1.3 Радіо-інтерфейс

У цьому розділі розглядається радіо-інтерфейс для LTE та LTE-A, його вміст базується на [1,4,5].

Відповідно до специфікацій 3GPP, в даний час існує 25 діапазонів частот для розділу частот дуплекс (FDD) і 12 для дублювання часу поділу (TDD) доступні для мобільних операторів, включаючи 800 МГц, 900 МГц, 1800 МГц, 2100 МГц, 2300 МГц та 2600 МГц. В Україні НКРЗІ (національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформації) вирішили в основному використовувати діапазони 1800 МГц та 2600 МГц для аукціону ліцензій на робочу частоту, а також в подальшому розглядається можливість використовувати діапазон 900 МГц. Слід зазначити, що різні несучі частоти породжують різні втрати у шляху, таким чином, різні зони покриття. Як показано на рисунку 1.7, радіус покриття базової станції зростає обернено з частотою при розгляді аналогічної передачі і отримання потужності та активності антени. Більш ретельне дослідження для розрахунку цього радіусу надане в розділі 2.1.

Як сказано в пункті 1.1, LTE використовує OFDMA для DL і SC-FDMA для UL. Основні причини цього пов'язані з тим, що використання SC-FDMA дозволяє поліпшити діапазон UL та поліпшити термін служби акумулятора пристрою. При використанні OFDMA переваги наступні (порівняно з іншими технологіями доступу):

- висока продуктивність при частотному вибіркового гасінні каналів;
- низька складність приймача базового діапазону;
- обробка декількох смуг пропускання;
- планування адаптації посилення та частотної області;
- сумісність із сучасними приймачами та антенними технологіями (наприклад, MIMO).

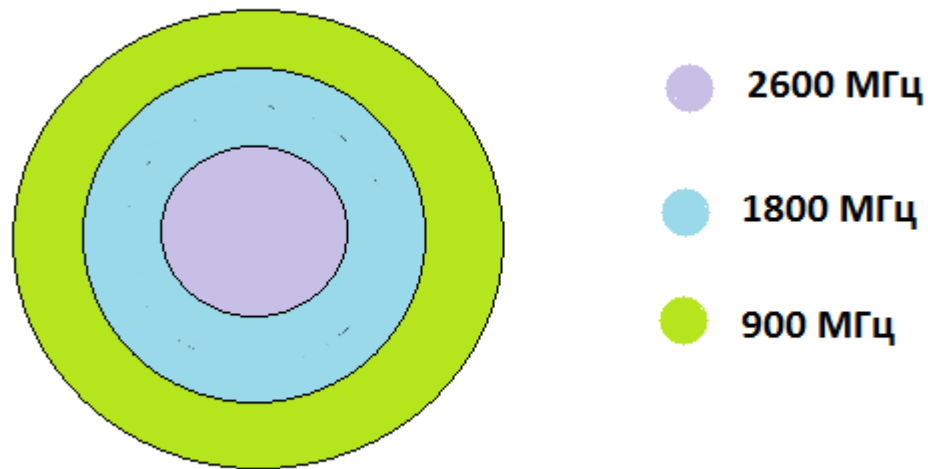


Рисунок 1.7 - Приклад різної несучої частоти та відповідної зони покриття

Принцип ортогональності визначає, що центральна частота для кожної з піднесучих відповідає нульовому значенню сусідніх провідників у частотній області. LTE визначає постійну відстань 15 кГц між піднесучими, що полегшує впровадження ефекту помилки і ефекту Доплера без значного погіршення ортогональності піднесучих. Щоб уникнути міжсимвольних перешкод (ISI) використовується циклічний префікс (CP), що означає, що остання частина символу скопійована таким чином, щоб символ був періодичним. Довжина префікса може бути різною, так, щоб вона була достатньо великою, щоб перевищити час затримки. Оскільки LTE підтримує як FDD, так і TDD, використовуються дві структурні схеми. Структурна схема типу 1 (FST1) використовується в FDD та структурна схема типу 2 (FST2) в TDD. Дана робота зосереджена на FST1, оскільки FDD підтримує дуплексне з'єднання. Максимальна довжина кадру складає 10 мс, розділена на 20 слотів - 0,5 мс, у той час як

два послідовні слоти (1 мс) утворюють один підкадр, як показано на рисунку 1.8, що представляє інтервал часу передачі (ТТІ).

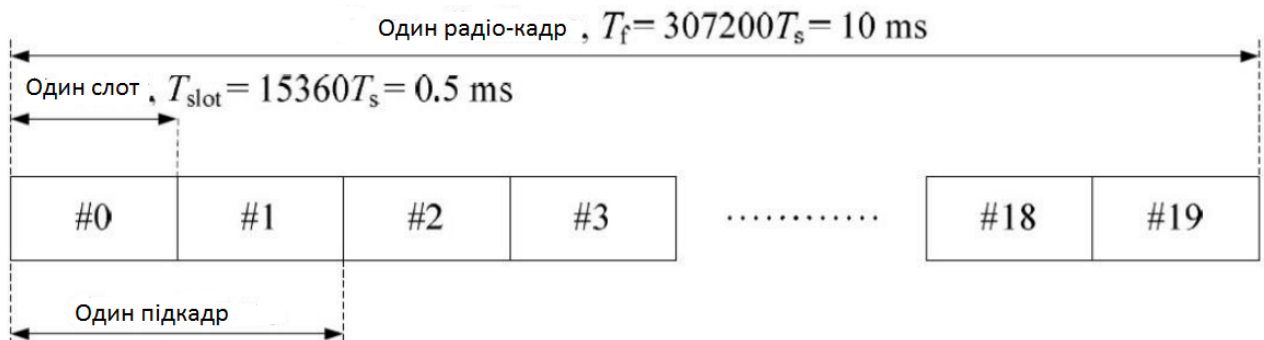


Рисунок 1.8 - Структура схеми типу 1

Планування частотного домену - це ще одна специфікація LTE, яка дозволяє динамічно розподіляти ресурси в частотній області, засновані на блоках ресурсів (RB), як показано на рисунку 1.9. Кожен RB складається з групи з 12 піднесучих, використовуючи загальну пропускну здатність 180 кГц і 7 або 6 символів OFDM у часовій області залежно від того, чи використовуваний CP короткий (5,21 мкс) або розширений (16,67 мкс). Мінімальна одиниця ресурсу - елемент ресурсу (RE), що складається з однієї піднесучої для одного символу OFDM, що означає, що RB може мати 84 (12 субнесучих \times 7 OFDM-символів) або 72 (12 піднесучих \times 6 OFDM-символів) RE на слот у часовій області. LTE визначає каналну смугу пропускання від 1,4 МГц до 20 МГц, що відповідає загальному 6-100 RB.

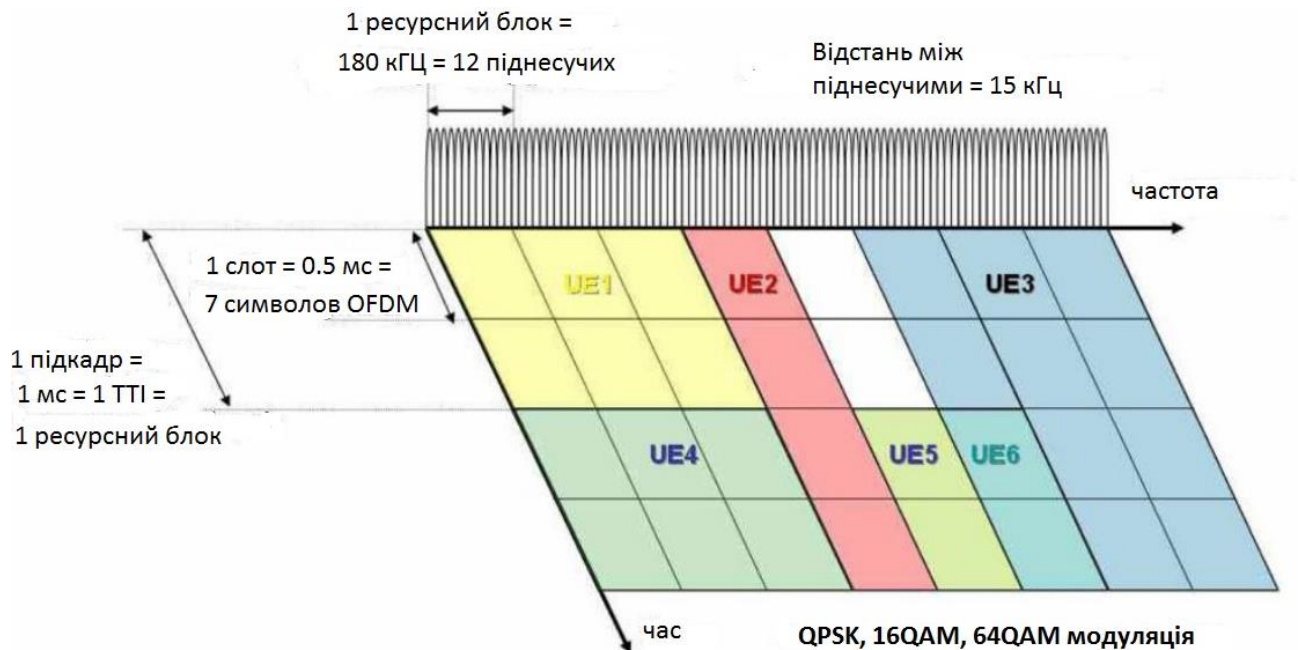


Рисунок 1.9 - Розподіл ресурсів OFDMA в LTE

Випуск 10 LTE-A дозволяє використовувати пропускну здатність каналу до 100 МГц за допомогою СА, в якій до п'яти реєстрів 8 носіїв згруповані, кожен з максимальною пропускнуною спроможністю в 20 МГц. СА можна використовувати в системах TDD і FDD, і, крім того, забезпечувати більшу пропускну спроможність передачі. Це полегшує ефективне використання фрагментованого спектру. Системи FDD завжди мають менше компонентних носіїв UL, ніж DL в той час як у TDD кожен носій компонентів використовує ту ж саму конфігурацію як в DL, так і в UL, виділяючи підкадри таким же чином. У таблиці 1.1 наведено співвідношення між доступною пропускнуною спроможністю, кількістю несучих та кількістю RB.

Таблиця 1.1 - Взаємозв'язок між пропускною спроможністю,
кількістю піднесучих та RB

Пропускна спроможність (МГц)	1,4	3	5	10	15	20
Кількість піднесучих	72	180	300	600	900	1200
Кількість RB	6	15	25	50	75	100

З іншого боку, переданий сигнал в OFDMA має найвищий середній показник (PAR), який вимагає високої лінійності в передачі. Лінійні підсилювачі мають низьку ефективність перетворення потужності, отже, і використання SC-FDMA в UL, що забезпечує кращу ефективність підсилювача потужності.

При використанні SC-FDMA тільки один символ надсилається одночасно, як у TDMA, проте сигнал є згенерованим в частотній області, тому він підтримує спектральні властивості OFDMA. CP додається періодично, але не в кінці кожного символу через збільшення швидкості символу. Виділення ресурсів представлено на рисунку 1.10, що дуже схоже на схему OFDMA, різниця в тому, що RB надаються постійно одному користувачеві в частотній області. Максимальна смуга пропускання 20 МГц, але це займає також поля для охоронних смуг, зменшуючи корисну пропускну спроможність.

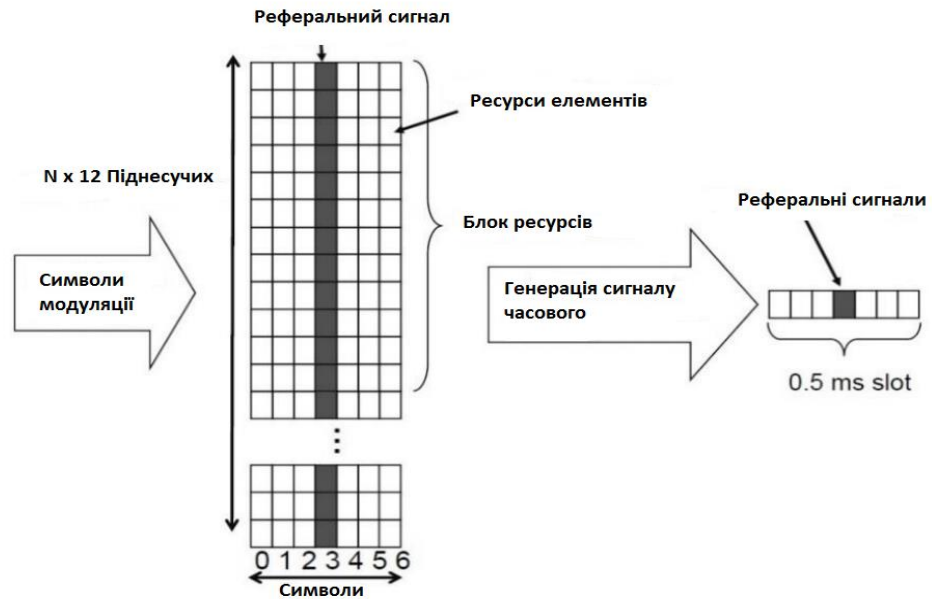


Рисунок 1.10 - Відображення ресурсів у SC-FDMA

Введення MIMO є одним з основних покращень у LTE. Просторове мультиплексування — один зі способів, який збільшує максимальну швидкість передачі даних (у два рази чи більше) шляхом надсилання сигналів з двох або більше різних антен з різними потоками даних. Останні розробки дозволяють до 8×8 для DL і 4×4 для UL. Попереднє кодування - це ще один процес, в якому використовуються сигнали, передані з різних антен, зважуються, щоб максимально збільшити прийняте співвідношення шумового сигналу (SNR). MIMO також покладається на різноманітність передачі, де один і той самий сигнал надсилається з іншої антени з деяким кодуванням.

Транспортні канали, що діють як інтерфейси між шаром контролю доступу до середовища (MAC) та фізичним шаром, відображаються на фізичних каналах. Види таких каналів:

- фізичний трансляційний канал (PBCH). Отримує параметри системи, необхідні для доступу користувача до UE системи;

- фізичний вхідний загальний канал (PD SCH). Основний фізичний вхідний канал для даних користувача, передачі системної інформації та пейджингових повідомлень;
- фізичний вихідний загальний канал (PUSCH). Еквівалент PD SCH, але для UL;.
- фізичний багатоадресний канал (PMCH). Передача контенту багатоадресного сервісу від DL до UE;
- фізичний канал випадкового доступу (PRACH). Використовується для випадкового доступу.

1.4 Сервіси та додатки

У цьому пункті представлена інформація про послуги та додатки в LTE, вміст яких базується на [1, 6, 7, 8].

Системи мобільного зв'язку в основному зосереджені на тому, щоб пропонувати бездротовий зв'язок для своїх користувачів, надавати їм послуги, які вони вимагають. На сьогоднішній день послуги та програми можуть мати різні форми та різні цілі, але голосовий зв'язок є найпопулярнішим серед усіх.

Голосовий сервіс є особливо передбачуваним, в тому сенсі, що він визначає постійну швидкість передачі, тож оператори в першу чергу стурбовані затримкою, що є чинником, який може впливати переважно на якість телефонного дзвінка. З іншого боку, послуги передачі даних стають все більш популярними, але вони також можуть бути дуже вимогливими з точки зору бітової швидкості, затримки і тривалості, що включає величезний трафік даних.

Послуги, такі як коротке текстове повідомлення (SMS), протокол передачі файлів (FTP), потокова передача відео, електронна пошта та веб-переглядач можуть мати різні вимоги до якості відповідно до їх конкретної мети. Головна особливість операторів мобільного зв'язку - це надання цих

послуг своїм клієнтам у будь-який час і в будь-якому місці, гарантуючи певну якість обслуговування. 3GPP визначає поняття UMTS та LTE QoS, визначаючи чотири класи послуг, які також називаються класами руху, які можуть бути використані як підхід для описання кожного типу послуги.

- Розмовні послуги включають послуги телефонного зв'язку, такі як голосові та відеодзвінки, голосовий інтернет дзвінок (VoIP) та інструменти для проведення конференцій. Цей клас в основному залежить від часу передачі (затримки) і часу відношення (варіації) між інформаційними об'єктами потоку.

- Потоковий сервіс сильно залежить від співвідношення часу між обома кінцями потоку, так і від поточкових аудіо/відео програм.

- Інтерактивні послуги, в яких один кінцевий користувач запитує дані з віддаленого обладнання, наприклад, сервер в основному характеризується шаблоном відповідей на запит від кінцевого користувача, а також прозорістю передачі пакетів, з низькою частотою помилок. Веб-браузер, соціальні мережі та автоматичні запити баз даних - це деякі приклади цього класу.

- Фонові служби складаються з кінцевих користувачів, які надсилають та отримують файли даних у фоновому режимі, де вони зберігаються і можуть бути доступні пізніше. Електронна пошта, SMS, MMS та хмарні програми - приклади цього класу трафіку, які служать для прозорого передавання корисних копій. Однак час доставки є менш актуальним.

У таблиці 1.2 наведено інформацію про вищезгадані класи QoS, а саме про реальні вимоги часу, симетрію потоків даних, необхідну гарантовану швидкість передачі даних, обмеження затримки часу, розширене використання буферів даних, скупчення трафіку та тип комутації. Однак, оскільки LTE є орієнтованою на дані, 3GPP перевизначив стандарти якості QoS, щоб відповідати бажаній

експлуатаційній ефективності. Хоча існує менша кількість параметрів, які потрібно визначити, і вони були всі оптимізовані:

- Ідентифікатор класу QoS (QCI) показує набір локально налаштованих значень для пріоритету, затримки та частки втрат. Є дев'ять попередньо налаштованих класів, представлених у таблиці 1.3.

- Пріоритет розподілу та збереження (ARP) вказує на пріоритет носія, порівняно з іншими носіями інформації, що надають інформацію про контроль надходження на предмет наявності затримок, коли носії повинні бути скинуті.

- Максимальна швидкість (MBR) визначає максимальну бітову швидкість для носія.

- Гарантована швидкість передавання даних (GBR) - це швидкість передавання, яка гарантується на носії.

- Сукупна максимальна швидкість передачі даних (AMBR) вказує загальний максимальний бітрейт UE, який можуть мати всі носії у PDN-з'єднанні.

Таблиця 1.2 - Підсумки класифікації трафіку QoS відповідно до 3GPP

	Розмовні послуги	Потоковий сервіс	Інтерактивні послуги	Фонові служби
Реальний час	так	так	ні	ні
Симетричність	так	ні	ні	ні
Бітрейт	гарантовано	гарантовано	Не гарантовано	Не гарантовано
Затримка	Мінімальна фіксована	Мінімальна змінна	Помірна змінна	Висока змінна
Буфер	ні	так	так	так

Продовження таблиці 1.2				
Рівномірність	ні	ні	так	так
Тип перемикання	круговий	круговий	пакетний	пакетний
Приклад	Голосовий/відео зв'язок	Відео в реальному часі	Веб-пошук	Електронна пошта, SMS, MMS

Існує дев'ять стандартизованих класів QCI, як показано в таблиці 1.3, які разом з їх відповідними параметри, дозволяють краще зрозуміти основні характеристики послуги. Тип ресурсу вказує, які класи матимуть GBR, який визначає пріоритет для планування пакетів, діапазон затримки допомагає планувальнику пакетів підтримувати достатню швидкість планування для задоволення вимог про затримку для носіїв і втрати, допомагає використовувати відповідні настройки керування радіозв'язком (RLC).

Таблиця 1.3 - Параметри QoS для QCI

QCI	Тип ресурсу	Пріоритет	Діапазон затримки пакету, мс	Співвідношення втрати пакетів	Приклад служб
1	GBR	2	100	10^{-2}	Розмовний Голос
2		4	150	10^{-3}	Розмовний відеоролик (трансляція в прямому ефірі)
3		3	50	10^{-3}	Гра в реальному часі
4		5	300	10^{-6}	Відеоролик без звуку (буферна потокова передача)

Продовження таблиці 1.3					
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Сигналізація IMS
6		6	300	10^{-6}	Відео (Buffered Streaming) на базі TCP (наприклад, www, електронна пошта, чат, ftp, обмін файлами p2p, прогресивне відео та ін.)
7		7	100	10^{-3}	Голос, відео (прямий потоковий), інтерактивні ігри
8		8	300	10^{-6}	Відео (Buffered Streaming) на базі TCP (наприклад, www, електронна пошта, чат, ftp, обмін файлами p2p, прогресивне відео та ін.)
9		9			

1.5 Міжчастотний хендовер

У цьому пункті розглядаються питання мобільності в мережах LTE стосовно міжчастотного хендоверу (НО), вміст якого базується на [1, 9, 10, 11].

Як зазначено в розділі 1.1, однією з основних цілей 3GPP є підтримка як зворотної, так і прямої сумісності, тому при вирішенні проблем мобільності завжди слід розглядати інше покоління мережі доступу. Хендовер може бути виконаний в межах E-UTRAN або від E-UTRAN до іншого RAT або EUTRAN з іншого RAT. Дана робота зосереджена на

міжчастотному внутрішньому LTE НО, де вимірювання проводяться на частотах, які відрізняються від несучої частоти DL обслуговуючої станції, хоча всі інші описані раніше ситуації можуть представляти інтерес для інших досліджень.

E-UTRAN дозволяє UE знаходитися в одній з двох станів: RRC_CONNECTED - встановлено з'єднання з радіоресурсним контролем (RRC,) чи RRC_IDLE - ні. У стані RRC_IDLE UE здійснює моніторинг каналу завантаження для виявлення отриманих запитів при надсиланні системної інформації та виконання вимірювання сусідніх комірок і вибору відповідних комірок, або ж повторного вибору. У RRC_CONNECTED UE спілкується з мережею, надсилаючи або отримуючи дані. Він також відповідає за моніторинг каналів управління, які пов'язані зі спільним каналом даних для визначення даних, які заплановані на це, і він забезпечує якість каналу та інформацію про зворотний зв'язок з eNB. Крім того, UE виконує вимірювання сусідніх комірок та звіти про вимірювання, як конфігурацію, що вимагається eNB. Коли UE запитує про зв'язок RRC (наприклад, коли з'являється новий вхідний дзвінок), він повідомляє eNB через загальний канал керування (CCCH), відправивши запит на з'єднання RRC повідомлення. ENB використовує цей канал для відправки повідомлення RRC Connection Setup на UE, що дозволяє йому встановити виділений контрольний канал (DCCH), відправивши налаштування підключення RRC знову до обслуговуючої eNB.

Як згадувалося раніше, UE постійно виконує вимірювання та повідомляє про них відповідно до параметрів, встановлених мережею. Перебуваючи в стані RRC_IDLE, метою UE є пошук комірки з Громадської Мобільної Мережі Землі (PLMN), яка підходить для початкового вибору або вважається кращим кандидатом для повторного вибору. У випадку, якщо UE знаходиться в RRC_CONNECTED стані, проводяться вимірювання, щоб вирішити, чи має місце НО чи ні. При

необхідності UE може використовувати проміжки вимірювань, тобто періоди, в яких проводиться міжчастотне вимірювання.

Для того, щоб контролювати, як UE визначає пріоритети кемпінгу на різних RAT або частотах E-UTRAN (шари), був реалізований новий метод рішення повторного вибору, який називається абсолютний пріоритет на основі повторного вибору. Кожен шар отримує пріоритет, і, на основі цього значення, UE намагається підключитися до найвищої пріоритетної частоти / RAT, якщо вона може забезпечити належне обслуговування.

Звіти про вимірювання можуть бути періодичними для автоматичного пошуку сусідніх базових станцій або подій, в яких UE надсилає повідомлення, якщо відбувається одне з наступних п'яти подій (тільки для E-UTRAN вимірювання):

Подія A1: комірка, що обслуговує, має кращий стан, ніж абсолютний поріг;

Подія A2: комірка, що обслуговує, має гірший стан, ніж абсолютний поріг;

Подія A3: стан сусідньої комірки стає кращим, ніж обслуговуюча;

Подія A4: сусідня комірка стає кращою за абсолютний поріг;

Подія A5: комірка, що обслуговує, стає гіршою, ніж абсолютний поріг 1, а сусідня стає краще, ніж абсолютний поріг 2.

Абсолютні пороги, згадані вище, є деякими параметрами, визначеними мережею, в порівнянні з виміряними рівнями сигналу та якістю, як більш докладно пояснюється в розділі 2.

ENB відіграє відповідну роль у ММ, оскільки він відповідає за контроль та оцінку радіосигналу вимірювання рівня, зроблену UE. Він також проводить аналогічні вимірювання самостійно, і на основі обох результатів, приймає рішення до НО UE між комірками, включаючи обмін НО повідомленнями між іншими eNBs та ММЕ.

У випадку внутрішнього LTE HO, повідомлення про передачу надсилається з вихідної eNB до цільової eNB для підготовки цільової комірки. Останній створює повідомлення реконфігурації RRC-з'єднання і надсилає повідомлення підтвердження запиту від HO до джерела eNB. Цей обмін повідомленнями виконується через інтерфейс X2 на eNB (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 - Процедура Inter-eNB HO

Цей інтерфейс, як правило, передає лише інформацію про контрольні лінії, але у зв'язку з HO також використовується для пересилання користувацьких даних. Основна різниця між площиною керування X2 та UP протоколів - це використання протоколу передачі контролю потоку (SCTP) для контрольної площини, що дозволяє забезпечити надійну доставку контрольної інформації між eNB та використанням користувацького протоколу датаграми (UDP) для передачі даних. Повідомлення запиту HO містить різні елементи інформації, такі як SAE, список обмежень HO (який може обмежувати певне HO для UE) та останні відвідані комірки, до яких було підключено UE (вважається корисним для уникнення зворотного зв'язку між двома комірками, хоча ця можливість

доступна лише у випадку накопичення історичної інформації UE). Коли це повідомлення надсилається, eNB запускає таймер, який у випадку відсутності зворотного зв'язку, скасовує підготовку HO та інформує цільовий eNB, що термін дії таймера закінчився. Можна скасувати поточну HO, використовуючи повідомлення "Відмова від HO". Повідомлення підтвердження запиту від HO містить не тільки інформацію про цільову eNB, а й містить всю (або, принаймні, частину) SAE, що передаються, та інформацію про тунель GTP-протоколу (GTP) для кожного носія SAE, щоб дозволити доставку блоків даних протоколу UL та DL (PDU). Також включено повідомлення про повторне налаштування зв'язку RRC, яке вихідна eNB надсилає до UE.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналітичний огляд мережі LTE та виявлено особливості її архітектури та впровадження, які показали, що мережа 4G може бути реалізована на частотах 900МГц, 1800МГц та 2600МГц.

2. Проаналізовані існуючі методи балансування навантаження та виявлено, що існуючі підходи орієнтовані тільки на балансування навантаження в рамках однієї частоти, що не є ефективним в умовах використання декількох смуг частот.

РОЗДІЛ 2. ОПИС МЕТОДІВ ТА МОДЕЛІ

2.1 Аналіз політик управління

У цьому розділі проаналізовані роботи, розроблені різними авторами стосовно балансування навантаження через міжчастотні НО, зважаючи на продуктивність мережі LTE, і показані основні висновки та результати, отримані шляхом моделювання та алгоритмічного аналізу.

Що стосується оцінки продуктивності, то, головним чином, слід розглядати пропускну спроможність, QoS та перешкоди для LTE. 3GPP використовує ці та інші концепції, пов'язані з продуктивністю, такі як ефективність використання радіочастот, швидкість передачі даних та охоплення, специфікація вимог та вдосконалень E-UTRAN, висвітлення їх актуальності для оцінки продуктивності та розгортання мереж LTE [12]. Також продуктивність LTE вивчалася у [1, 13, 14, 15].

У LTE, як і в інших стільникових мережах, пропускну спроможність може розглядатися як максимальна агрегована швидкість передачі даних, яку одна станція може обробляти за певний час. Сукупна швидкість передачі даних в цьому випадку відповідає сумі швидкості передачі даних від усіх активних користувачів, що обслуговуються коміркою, які, у свою чергу, безпосередньо пов'язані з кількістю виділених RBs на одного користувача, що підтверджує співвідношення між кількістю доступних RBs та кількістю користувачів, які можуть бути їм призначені. Інший можливий підхід до оцінки пропускну спроможності полягає у визначенні конкретних послуг або вимог QoS для визначення кількості користувачів, які обслуговуються на однакових умовах одночасно. Доступна смуга пропускання та її ефективне використання є основним обмеженням, але, завдяки різноманітним вимогам до сервісу, інші параметри продуктивності системи виявляються більш обмеженими, такі як пропускну спроможність, затримка та SINR.

Пропускна спроможність також обмежується наявною смугою пропускання та кількістю виділених RBs, не менш важливими факторами є інтервал між піднесучими, схема модуляції, кількість символів у кожному підкадрі, розмір CP, швидкість кодування каналів, конфігурація антени та керування/сигналізація накладних витрат. Відповідно до [12] цільова максимальна швидкість передачі даних, яка підтримується з точки зору вимог до системи, тобто максимальна швидкість передачі даних незалежно від деяких параметрів, описаних вище, має становити 1 Гбіт/с для DL та 500 Мбіт/с для UL. 3GPP також визначив, що ефективність КМС (найвища швидкість передачі даних, нормована загальною пропускну здатністю комірок, якщо враховувати безпомилкові умови, коли всі доступні радіоресурси для відповідного напрямку зв'язку призначаються лише одному єдиному UE) системи повинні бути 30 (біт/с)/Гц для DL з 8×8 антенною конфігурацією та 15(біт/с)/Гц для UL з 4×4 антеною. Ефективність середнього спектру визначається як кількість бітів, отриманих протягом певного проміжку часу, нормованого загальною пропускну здатністю клітини у відношенні до кількості комірок. Система повинна орієнтуватися в цілому на 3,7 (біт/с)/Гц/комірку для DL з конфігурацією антени 4×4 та 2 (біт/с)/Гц/комірку для UL з 2×4 антеною. Цільова пропускна спроможність для користувачів на краях стільникових мереж також зазначена в [12] і має становити не більше 0,12 (біт/с)/Гц/комірку/користувача для DL і 0,07 (біт/с)/Гц/комірку/користувача для UL (використовуючи ті ж антенні конфігурації, як в середній ефективності спектра).

Що стосується мобільності, система повинна мати можливість підтримувати UE, що рухається до 350 км/год (або до 500 км/год залежно від частоти). 3GPP стверджує, що продуктивність системи повинна бути посилена, коли UE рухається від 0 км/год до 10 км/год, і вона ніколи не

повинна бути гіршою, ніж її продуктивність при роботі з більш високою швидкістю руху UE.

Що стосується керування компонентами (CC), [16] запроваджує три політики управління, які пропонують різні накладні витрати на сигналізацію RRC та різні криві SINR для сценаріїв CA, де клітини мають різні зони покриття. Поліпшення політики управління полягає в тому, щоб мінімізувати кількість реконфігурацій RRC, зафіксувавши первинну CC (PCC) під час налаштування UE з вторинною коміркою (SCell), коли це можливо, незалежно від будь-яких існуючих відмінностей в умовах радіостанції між первинною коміркою (PCell) і SCell. З іншого боку, в документі також представлена жорстка політика управління, де метою є динамічне та постійне вдосконалення CC, що використовуються UE, шляхом постійного зміни PCC та додавання або видалення вторинних CC (SCC) відповідно до радіо умов. Третьої політики управління є компромісом між попередніми двома, тобто PCC змінюється динамічно відповідно до умов, але SCell завжди призначається UE, наскільки це можливо. Рисунок 2.1 підсумовує три пропоновані політики управління.

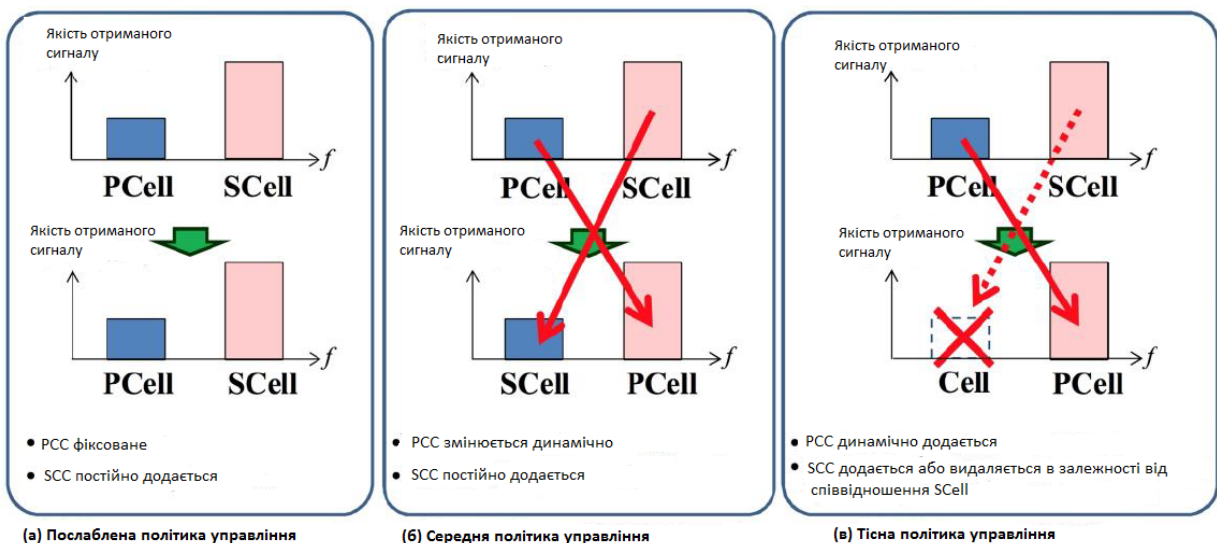


Рисунок 2.1 - Політики управління CC

Результати моделювання показують, що криві SINR для PCell у середовищі та тісній політиці управління покращені порівняно з кривими, отриманими при вільній політиці.

В [17] показані методи керування CC та методи планування пакетів шляхом оцінки двох методів балансування навантаження (LB) та порівняння запропонованого алгоритму перехресного пакетного планування (PS) із системою, що використовується в системах LTE. Алгоритм Round Robin (RR) призначає нещодавно підключеного користувача до оператора з менш активними користувачами, тоді як алгоритм Mobile Hashing (MH) використовує вихідний алгоритм хешування UE, після чого він буде відображений безпосередньо на індекси CC та забезпечує збалансоване навантаження CC в довгостроковій перспективі. В даній роботі робиться висновок, що існуючий метод забезпечує кращу продуктивність при малій кількості користувачів і низькому відсотку користувачів LTE-A. Для PS це дослідження виконує існуючий планувальник Proportional Fair (PF) і пропонує просте розширення для нього, де показник планування на кожному CC враховує пропускну спроможність минулого користувача над усіма агрегованими CC замість того, щоб розглядати кожен CC незалежно від пропускну спроможності. Результати моделювання показують, що при порівнянні обох алгоритмів покращення може становити до 90% або до 40% в залежності від швидкості підключення користувача.

Автори [18] використовують інший підхід, одночасно розглядаючи LB та мінімізацію навантаження мережі, як багатоцільову задачу оптимізації та перетворення її пізніше на задачу оптимізації однієї агрегованої цільової функції. Запропонований алгоритм складається з рішення НО та керування доступом до викликів (CAC), обидва обмежені наявністю ресурсів у комірці, SINR користувача та визначеним приростом LB, вираженим в термінах цільової функції, згаданої раніше. Перші два

результати моделювання оцінюють ефективність алгоритму в термінах LB та нових частот блокування викликів, коли проблема оптимізації фокусується лише на LB, лише при мінімізації завантаження мережі або в інших восьми конфігураціях, де вплив цих двох параметрів зважується, використовуючи єдину агреговану цільову функцію в пошуках оптимальної вартості відносно цього компромісу. Решта моделювання оцінює різницю швидкості запуску користувача на LB, нові частоти блокування викликів, середню завантаженість мережі та ефективність пропускної спроможності мережі, порівняння оптимізованого алгоритму LB з алгоритмом, оптимізованим для середнього завантаження мережі, та зваженим алгоритмом, використовуючи оптимальне значення, обране для першого моделювання. Представлені висновки показують, що зважений алгоритм може зменшити швидкість блокування нових викликів при зменшенні зайнятості мережевих ресурсів та підвищення ефективності пропускної спроможності мережі.

Інший підхід, який дозволяє поліпшити загальну ефективність мережі, - це оцінка навантаження, як це пропонували автори [19]. Запропонований алгоритм спирається на вимірювання UE та дані eNB для оцінки навантаження на комірку перед передачею користувача через LB НО. Цей метод спрямований на пошук оптимального значення зміщення НО між перевантаженою коміркою та потенційною коміркою-мішенню, що гарантує, що перенесені користувачі не повертаються до вихідної комірки, отже, зменшується навантаження. Результати моделювання порівнюють віртуальне навантаження на комірках за часом та кількістю незадоволених користувачів (тобто частину користувачів, які не можуть обслуговуватись з потрібною якістю обслуговування) при використанні системи посилення 3GPP LTE або запропонованого алгоритму. Останнє зауваження показує, що це рішення може покращити розподіл навантаження між мережевими комірками, отже, підвищити продуктивність

мережі. Проте, немає ніяких сумнівів щодо складності цього алгоритму та його впливу на мережу, збільшення накладних витрат сигналу та часу обробки ϵ_{NB} .

[20] містить результати моделювання кількості виконаних, непотрібних та пропущених НО у різних ситуаціях навантаження в мережі та врахування різних рівнів перешкод при використанні лише вимірювання RSRQ. Цей метод виявився мало корисним або мало користи порівняно з використанням лише вимірювань RSRP. Таким чином, слід використовувати вивчення обох вимірювальних значень для НО. Ця робота була розроблена в [21], де автори оцінюють частоти між частотами НО, коли використовуються RSRP, RSRQ або комбінація цих двох значень. Крім того, визначають п'ять критеріїв, відповідно до міжчастотного вимірювання проміжних розривів та критеріїв прийнятності рішення, а також оцінюються за допомогою коефіцієнта втрати пакетів та кількості НО, що спостерігаються при моделюванні. Мережа моделюється як у сценаріях високого, так і низького завантаження системи, а час кадрів імітованих комірок може бути синхронним або встановлюватися незалежно. Перші результати показують, що варіація RSRQ дуже чутлива до навантаження системи, тоді як RSRP показує високу стабільність як в синхронному, так і в асинхронному режимі. Згодом автори підкреслюють критерій, який враховує як порогові значення RSRP, так і RSRQ для активації міжчастотного вимірювального розриву, і використовує обидва вимірювальні значення для міжчастотного рішення НО, оскільки цей критерій призводить до зниження середньої швидкості пакету нижче 1%, при досягненні середнього числа передач, що надається приблизно на 50% від базового випадку, який лише враховує вимірювання RSRP для міжчастотних НО. Інші критерії можуть досягти кращих результатів в одному з параметрів, однак загальна ефективність зазначеного критерію

краще, якщо враховувати компроміс між коефіцієнтом втрати пакетів та кількістю НО.

2.2 Початковий огляд методів

Розглядаючи різні БС, які використовують кілька носіїв, було обрано ідеальний сценарій, щоб оцінити різні параметри, що представляють інтерес для обсягу дисертаційної роботи. Встановлено ієрархічний сценарій покриття, що складається з трьох носіїв, що працюють у смугах 2600 МГц, 1800 МГц та 900 МГц, кожна з яких має визначену максимальну кількість RBs відповідно до ширини смуги системи. Частота 2600 МГц має максимальну кількість 100 RBs, частота 1800 МГц - 75 RBs, а 900 МГц - 50 RBs, що означає, що кожен носій має пропускну спроможність 20 МГц, 15 МГц та 10 МГц, відповідно. Ієрархічна концепція охоплення ґрунтується на те, що найбільш центрований носій може запропонувати більшу пропускну спроможність і тому вважається кращим рішенням для певного UE. BSs вважаються достатньо близькими, щоб забезпечити безперервне охоплення, що перекриває частину ділянок покриття 1800 МГц та 900 МГц, як показано на рисунку 2.2.

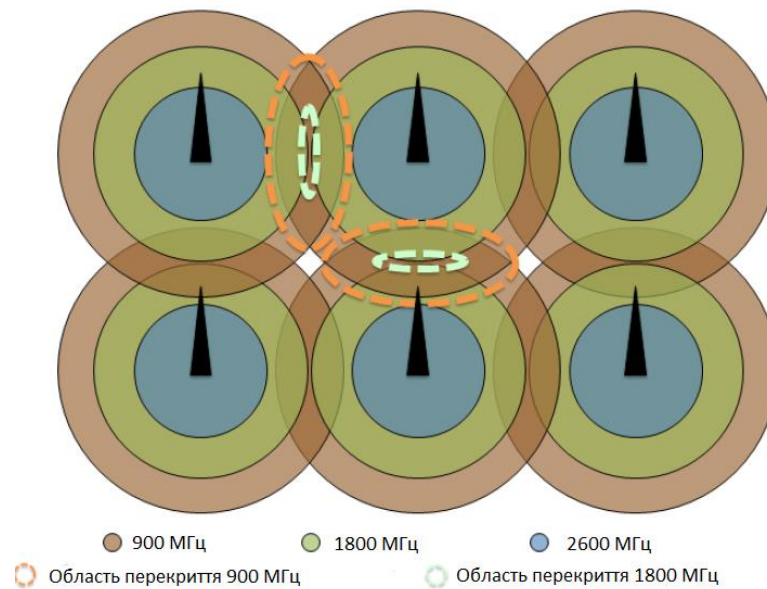


Рисунок 2.2 - Ідеальний сценарій для розгортання кількох перевізників та відповідних областей, що перекриваються

Для початкових етапів моделювання не розглядається потужність перешкод, тому SNR може використовуватися для визначення умов радіоканалу для певного UE:

$$\rho_N[\text{db}] = P_{R_x}[\text{dbm}] - N[\text{dbm}] \quad (2.1)$$

де: P_{R_x} - живлення на вході приймача; N - потужність шуму в приймачі.

Після того, як визначена доступна інформація про розподіл RBs між користувачами та їх відповідними SNR, доступний SINR може бути розрахований таким чином, щоб враховувати перешкоди на продуктивність системи за допомогою:

$$\rho_{IN}[\text{dB}] = 10 * \log\left(\frac{P_{RX}[\text{mW}]}{N[\text{mW}] + I[\text{mW}]}\right) \quad (2.2)$$

де: I : потужність перешкод у приймачі, що визначається як

$$I[\text{mW}] = \sum_{i=1}^{N_i} I_i[\text{mW}] \quad (2.3)$$

де: I_i - потужність перешкод, що надходить від передавача i ; N_i - кількість сигналів перешкод, що надходять до приймача.

Сила кожного перешкодного сигналу також задається формулою:

$$P_r[\text{dBm}] = P_{\text{EIRP}}[\text{dBm}] + G_r[\text{dBi}] - L_{p,\text{total}}[\text{db}] \quad (2.4),$$

де: P_r - доступна потужність у приймальній антени, P_{EIRP} - ефективна ізотропна потужність випромінювання; G_r - посилення приймаючої антени; $L_{p,\text{total}}$ - загальна втрата шляху.

Враховуючи таку ж саму модель розповсюдження та вирази втрат шляху, розглянуто лише сигнали, які мають потужність, що дорівнює або перевищує потужності шуму, оскільки тільки вони можуть негативно впливати на продуктивність системи.

Розбіжність SINR між комірками та користувачами, які використовують комірки, зазвичай є дуже високою у стільникових системах, як зазначено вище, особливо якщо вони страждають від обмежень покриття. Це призводить до зниження пропускної спроможності для стільникових користувачів порівняно з комірками-центрами, що призводить до великої невідповідності QoS з точки зору географічного покриття, а також з точки зору наявної пропускної спроможності даних в зоні покриття.

Що стосується розрахунку пропускної спроможності, то можна отримати теоретичні бітові швидкості в DL за допомогою [22]:

$$R_b[\text{Mbit/s}] = \frac{N_{\text{sub/RB}}[\text{sub-carrier/RB}] * N_{\text{sym/RB}}[\frac{\text{symbol}}{\text{sub-carrier}}] * N_b[\frac{\text{bit}}{\text{symbol}}]}{T_{\text{RB}}[\mu\text{s}]} * N_{\text{RB}} * N_{\text{MIMO}} \quad (2.5),$$

де sub/RB - кількість піднесучих на RB (12 при розгляді інтервалу піднесучих 15 кГц, які відповідають смузі пропускання 180 кГц RB);

- $N_{\text{sym/sub}}$: кількість символів на піднесучій (7, коли використовується звичайний CP);

- N_b/sym : кількість бітів на символ, що залежить від схеми модуляції та кодування;

- N_{RB} : кількість RBs;

- N_{MIMO} : замовлення MIMO (2, для 2×2);

- TRB : тривалість часу RB, що становить 500 мкс.

Згідно з [23] та використанням (2.2), досяжна пропускна спроможність при розгляді перешкод визначається:

$$R_{b[Mbit/s]} = N_{RB} * B_{RB[MHz]} * \log_2(1 + \rho_{IN}) \quad (2.6)$$

де BRB - пропускна спроможність RB.

Для початкового підходу діапазон антени сектора обчислюється шляхом розгляду сценарію NLoS, оскільки в міру збільшення відстані до BS імовірність LoS зменшується. Тому більш імовірно, що UE, розташовані далі від обслуговуючого сектора, знаходяться в умовах NLoS. UE вважається обслуговуваним, якщо він досяг певної мінімальної пропускної спроможності для своїх вимог до послуг. Далі діапазон антени сектора розраховується як відстань UE, яка знаходиться далі від обслуговуючого сектора:

$$R_{sector} [m] = d_{max} [m] \quad (2.7)$$

де: d_{max} - відстань UE від обслуговуючої секторної антени.

Для того, щоб досягти більш точної оцінки як системних, так і послідовних характеристик, реалістичне моделювання умов поширення здійснюється за допомогою моделей каналів, представлених у [23]. Моделі каналів LTE, що раніше були визначені Міжнародним союзом електрозв'язку (MCE) і 3GPP для GSM та UMTS, асоціюються з низьким, середнім та великим значенням часу затримки. Модель Extended Pistor A (EPA) забезпечує низький розподіл затримки (з коефіцієнтом середньоквадратичної затримки 43 нсек), що використовується в міському середовищі з досить малими розмірами комірок, тоді як Extended Vehicular A (EVA) та Extended Typical Urban (ETU) асоціюються з середовищем (з середньою квадратною величиною 357 нсек) та великими (із середньою квадратною величиною 991 нсек) значеннями часу затримки, відповідно. Ці моделі враховують низькі (5 Гц), середні (70 Гц) та високі (300 Гц)

доплерівські зсуви, що дозволяють використовувати загальні комбінації ERA 5 Гц, EVA 5 Гц, EVA 70 Гц і ETU 70 Гц.

Якість сигналу, отриманого UE, впливає на якість каналу обслуговуючого сектора, рівень перешкод від інших секторів, а також досвідний рівень шуму. Для того, щоб вирішити цю проблему і підвищити ємність та охоплення для певної передавальної потужності, передавач намагається узгодити швидкість передачі даних для кожного користувача з коливаннями якості отриманого сигналу, яка називається адаптацією посилення, яка, як правило, заснована на адаптивній модуляції та кодування (AMC), що дозволяє адаптувати схему модуляції та швидкість кодування відповідно до умов каналу.

Що стосується схем модуляції, то слід враховувати, що модуляції нижчого рівня є більш надійними і, отже, є кращим вибором для ситуацій, коли спостерігаються вищі рівні перешкод. Тим не менш, нижчі передавальні швидкості досягаються за допомогою цих схем модуляції, таких як Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), тому модулі високого рівня також розглядаються в LTE. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM) забезпечує кращі бітові швидкості, хоча вона є більш чутливою до помилок через чутливість до шумів, перешкод і помилок оцінювання каналів. Це означає, що якщо SINR досить високий, зазвичай вибирається модуляція високого порядку. Використана кодова швидкість також залежить від умов каналу. Якщо виявлено високий SINR, можна використовувати високий коефіцієнт кодування, тоді як нижчі коефіцієнти коду використовуються при поганих умовах каналу.

Вищезазначені поняття використовуються при застосуванні до моделювання поведінки системи та відповідного тренажера з використанням виразів, які встановлюють гарне наближення для зв'язку між пропускнуною спроможністю та SINR, використовуючи такий загальний

вираз, де A , B та C є константами, які визначені відповідно до схеми модуляції та кодування:

$$R_b[\text{Mbit/s}] = \frac{A}{B + e^{-C \cdot P_{IN}[\text{dB}]}} \quad (2.8)$$

Що стосується визначення навантаження, то можна використовувати загальне формулювання, розділяючи кількість необхідних ресурсів на загальні доступні ресурси в комірці. Зокрема, оскільки ресурси LTE складаються з OFDM-символів у часовій області та піднесучих у частотному домені, швидкість символу DL дається числом символів DL OFDM, що дорівнює кількості піднесучих даних протягом тривалості кадру. Крім того, загальна кількість RBs в комірці LTE фіксується, тому можна визначити відповідну комірці для навантаження (2.9):

$$C_{cell} = \frac{N_{RB, scheduled}}{N_{RB, cell}} \quad (2.9)$$

де: $N_{RB, schsc}$ - загальна кількість запланованих RBs у відповідній комірці; $N_{RB, cell}$ - загальна кількість RBs у відповідній комірці.

Це значення коливається від 0 до 1, а при близькому до 1 - означає, що певна комірка перевантажена, і тому вона має більшу ймовірність переривання надання послуг деяким користувачам, тому LB слід враховувати, коли C_{cell} перевищує 90%. Ті самі позначення можуть бути використані для представлення навантаження даного користувача в певній комірці:

$$C_{user} = \frac{N_{RB, user}}{N_{RB, cell}} \quad (2.10)$$

де: $N_{RB, user}$ - загальна кількість запланованих RBs для певного користувача в відповідній клієнтській комірці.

Параметри, представлені в цьому розділі, дозволяють визначати продуктивність системи, що відповідає меті даної дисертації. Розподіл навантаження, як і раніше, є одним з основних об'єктів дослідження в рамках розглянутої мережі, тоді як аналізуються також інші важливі параметри, такі як кількість RBs, що виділяються в кожній несучій частоті

та у кожному виді послуг, з тим, щоб можна було оптимізувати пропускну спроможність та розподіл користувачів по мережі.

2.3 Опис алгоритму міжчастотного хендовера

Запропонований алгоритм орієнтований на надання найвищого значення пропускну спроможності користувачам, беручи до уваги їх позицію відносно передавальної антени, а також пріоритети послуг, що використовуються. Як згадувалося раніше, навантаження кожного користувача в секторі та навантаження кожного сектора є іншими параметрами, які також мають велике значення для прогресу алгоритму, оскільки вони служать як параметри для прийняття рішень.

Кожного разу, коли користувач намагається підключитися до мережі, він підпорядкований новому процесу прийому сигналів, в якому UE намагається підключитись до першої eNB, яка гарантує мінімально необхідну пропускну спроможність для потрібної послуги, при цьому обмежується його SINR і наявними ресурсами сектора (рис. 2.3). Користувачі, які не обслуговуються, зберігаються у списку затриманих користувачів для подальшого аналізу.

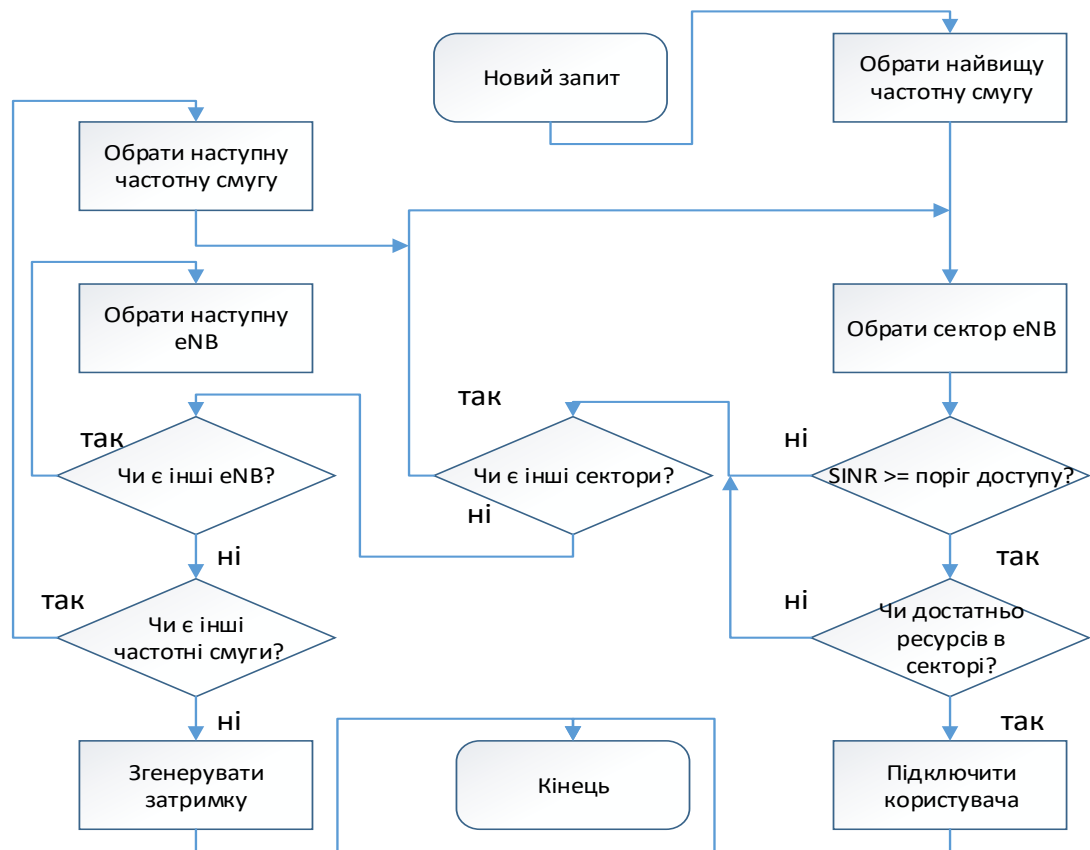


Рисунок 2.3 - Новий процес прийому вхідних сигналів

На першому етапі проводиться статичний аналіз впливу існування різних комбінацій несучої частоти з точки зору обслуговування користувачів, завантаження мережі та пропускної спроможності користувачів. Оцінюється потенціал кожного сектору, а у випадку, якщо навантаження в секторі перевищує 90%, користувачі вибираються для додавання до списку затриманих користувачів також для подальшого аналізу. Алгоритм виконує пошук користувача з найменш пріоритетним сервісом, використовуючи декілька RBs, достатніх для того, щоб мати змогу самостійно завантажувати сектор. Якщо в цій ситуації є два або більше користувачів, алгоритм вибирає того, який займає менше ресурсів, а потім - користувача, чия пропускна спроможність є найнижчою (рис. 2.4).

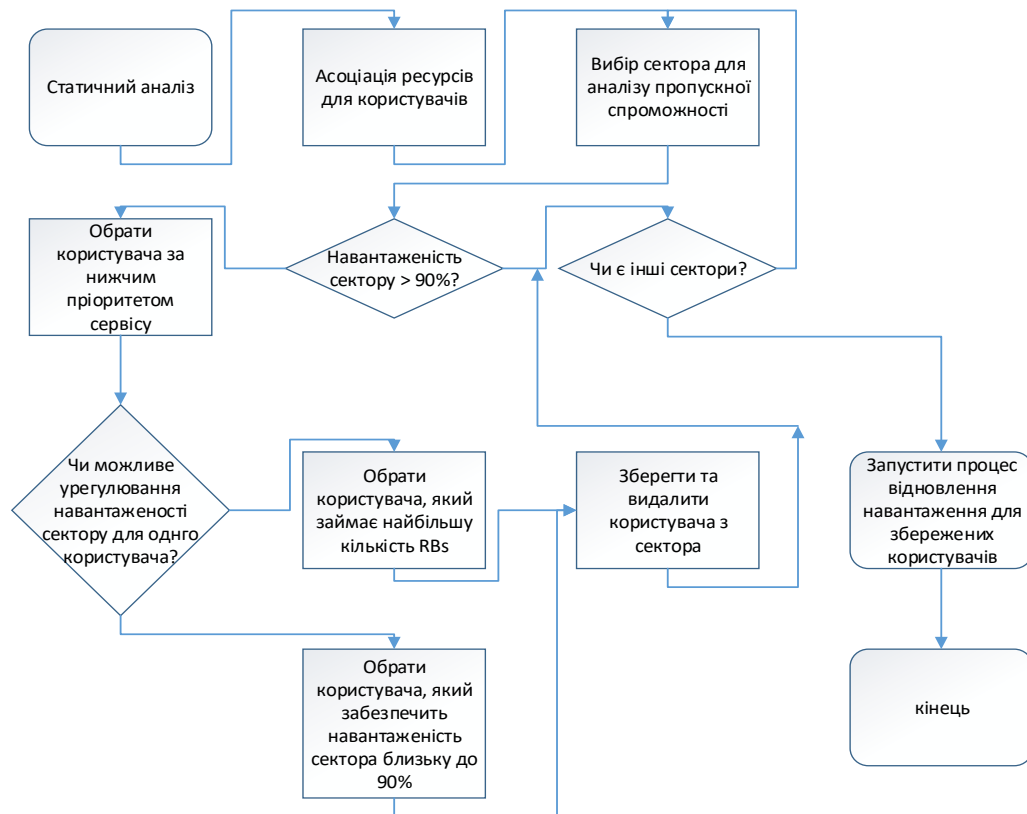


Рисунок 2.4 - Процес статистичного аналізу

Після цього алгоритм спробує знову підключити користувачів до списку затриманих користувачів назад у мережі. Процес відновлення завантаження дуже схожий на новий процес прийому вхідних сигналів, але різниця полягає в тому, що він враховує 90% навантаження на цільовий сектор, як показано на рисунку 2.5. Користувачі, які не підключені після цього кроку, затримуються та зберігаються для процесу динамічного аналізу.

Коли всі сектори мають навантаження до 90% або дорівнюють цьому, розмір файлу або тривалість дзвінка розподіляється кожному користувачеві відповідно до служби, як це пояснено в наступному розділі, і розпочнеться аналіз динамічного мережевого діапазону (рис. 2.5). Під час кожного кроку користувачі зменшують розміри файлів або зменшують тривалість їхніх викликів, доки вони не завершать завантаження чи телефонний дзвінок. Після цього користувач видаляється з сектору,

розподілені йому RBs звільняються, і він зберігається в списку користувачів, які намагатимуться підключитися до мережі на більш пізньому етапі.

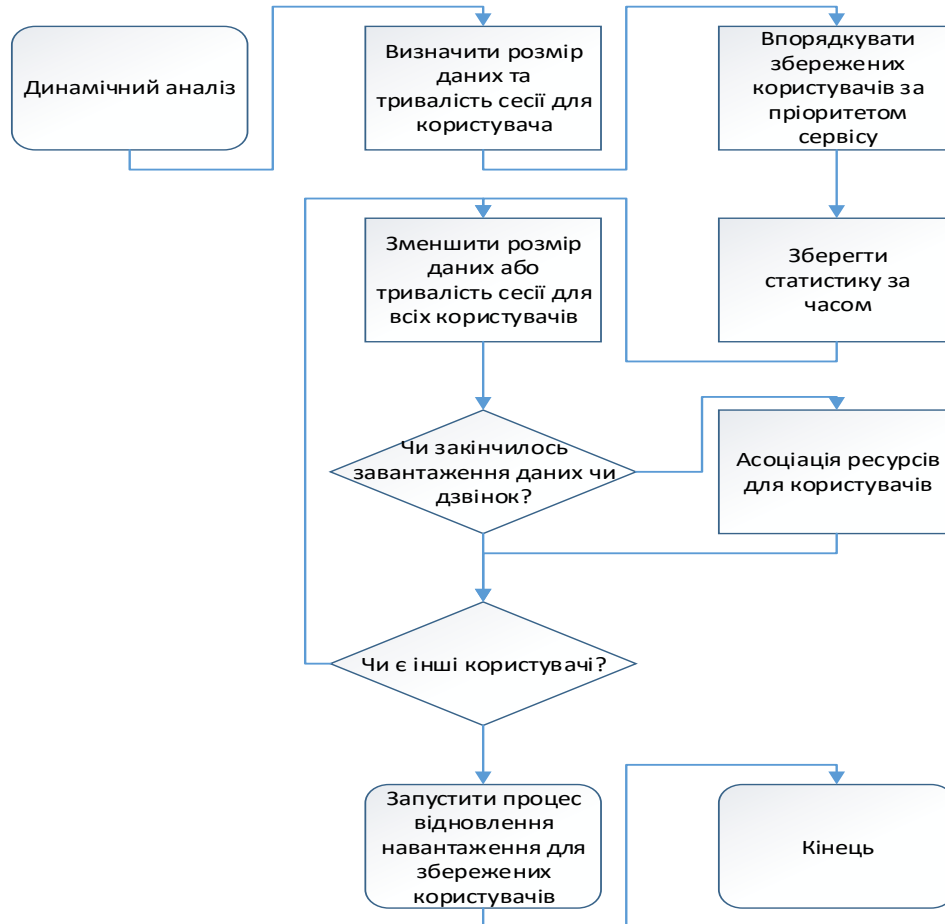


Рисунок 2.5 - Процес динамічного аналізу

2.4 Опис системи моделювання

Система моделювання ns-3 - це симулятор для дискретних подій, орієнтований, перш за все, на дослідження та освітнє використання. Проект ns-3, розпочатий у 2006 році, є проектом з відкритим кодом, що розробляє ns-3.

Ключовими моментами ns-3 є наступне:

- ns-3 має відкритий вихідний код, і проект прагне підтримувати відкрите середовище для дослідників для участі та обміну своїм програмним забезпеченням.

- ns-3 не є зворотним сумісним розширенням ns-2; це новий симулятор. Обидва симулятора написані на C++, але ns-3 - це новий симулятор, який не підтримує API ns-2. Деякі моделі ns-2 вже були перенесені з ns-2 на ns-3. Проект продовжуватиме підтримувати ns-2, поки будуватиметься ns-3, і вивчатиме механізми переходу та інтеграції.

ns-3 був розроблений, щоб забезпечити відкриту, розширювану платформу моделювання мережі для дослідження мереж. ns-3 забезпечує моделі роботи мереж пакетних даних та їх виконання, а також забезпечує симуляцію для користувачів для проведення експериментів із моделювання. Деякі особливості ns-3 використовують для виконання досліджень, які важче або неможливо виконати з реальними системами, для вивчення поведінки системи в умовах висококонтрольованого, відтворюваного середовища та вивчення того, як мережі працюють. Користувачі відзначають, що доступна модель, встановлена в ns-3, зосереджена на моделюванні роботи мережевих протоколів та мереж, але ns-3 не обмежується Інтернетом; ns-3 можна використовувати для моделювання систем, не пов'язаних з Інтернетом.

Багато інструментів моделювання існують для досліджень мережевого моделювання. Нижче наведено кілька відмінних рис ns-3 від інших інструментів.

- ns-3 розроблено як набір бібліотек, які можна об'єднати разом, а також з іншими зовнішніми бібліотеками програмного забезпечення. Хоча деякі імітаційні платформи надають користувачам єдиний інтегрований графічний інтерфейс користувача, в якому виконуються всі завдання, ns-3 є більш модульним у цьому відношенні. Кілька зовнішніх аніматорів та засоби аналізу та візуалізації даних можуть використовуватися з ns-3. Проте користувачі повинні розраховувати на роботу в командному рядку та за допомогою інструментів розробки програмного забезпечення C++ та/або Python.

- ns-3 в основному використовується в системах Linux, хоча існує підтримка для FreeBSD, Cygwin (для Windows) та розробка власної підтримки Windows Visual Studio.

- ns-3 не є офіційно підтримуваним програмним продуктом будь-якої компанії.

ns-3 побудована як система програмних бібліотек, які працюють разом. Користувачські програми можуть бути написані у зв'язку з (або імпортувати з) цими бібліотеками.

2.5 Оцінка розробленої моделі

Результати, надані симулятором, пізніше обчислюються за допомогою середніх та стандартних показників відхилень. Це важливі елементи, які мають велике значення, оскільки вони підтримують наступні аналізи. Для кожного аналізу розглядається до 30 моделювань, що забезпечує статистичну відповідність. Всі три частоти носіїв розглядаються як одночасно, так і окремо, дозволяючи оцінювати всю мережу або лише конкретну її станцію або пару станцій. Загальне середнє та стандартне відхилення обчислюються в кожному сценарії, беручи до уваги значення, отримані в кожній з моделей, використовуючи відповідно (2.11) та (2.12).

$$\mu = \frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N \mu_n \quad (2.11)$$

де:

- N : кількість моделювань;
- μ_n : середнє значення, отримане при симуляції n .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N \sigma_n^2} \quad (2.12)$$

де: σn : стандартне відхилення, отримане при моделюванні n .

Для того, щоб оцінити результати з точки зору кількості активних користувачів для кожної станції, його значення було отримано та проаналізовано, як зазначено вище, з тим щоб він міг відобразити рисунок 2.6, рисунок 2.7 та рисунок 2.8. Кожна цифра відповідає інформації про певну пару несучих частот і враховує різну кількість охоплених користувачів. Розглянута пара носіїв являє собою комбінації двох з трьох доступних частотних діапазонів для LTE, кожна з яких є визначеним сценарієм для дослідження, як це детальніше пояснюється в розділі 3. Для кожного сценарію можна побачити, що стандартне відхилення середньої кількості активних користувачів завжди стабілізується до заданого значення.

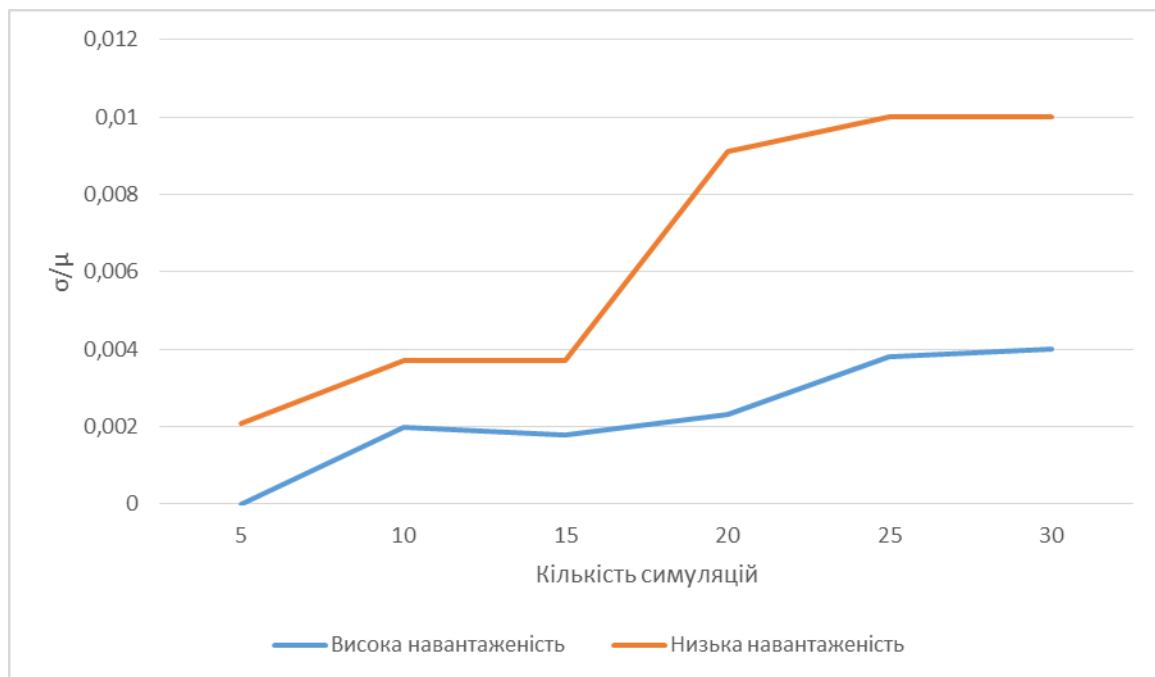


Рисунок 2.6 – Стандартне відхилення від середньої кількості активних користувачів, для високого та низького навантаження, для комбінацій носіїв із частотою 2600 МГц та 1800 МГц.

Оскільки в моделюванні розглядається сукупність шести eNB, користувачі створюються з 100 до 1000 з кроком 100, а число обслуговуваних користувачів зростає до тих пір, поки мережа не досягне

максимальної потужності, а отже, і насичується. Після цього було створено більшу кількість користувачів, щоб переконатися, що аналіз навантаження знаходиться в його межах. Отримані значення варіації в послідовному моделюванні за тим самим сценарієм відбуваються через те, що деякий аналіз, проведений симулятором, є стохастичним, таким як ймовірність виникнення LoS для певного користувача, розподіл спектру та розподіл користувачів по різних районах Києва, тобто центр або поза центром. На рисунку 2.09 представлена попередньо описана поведінка щодо активних користувачів відносно охоплених користувачів.

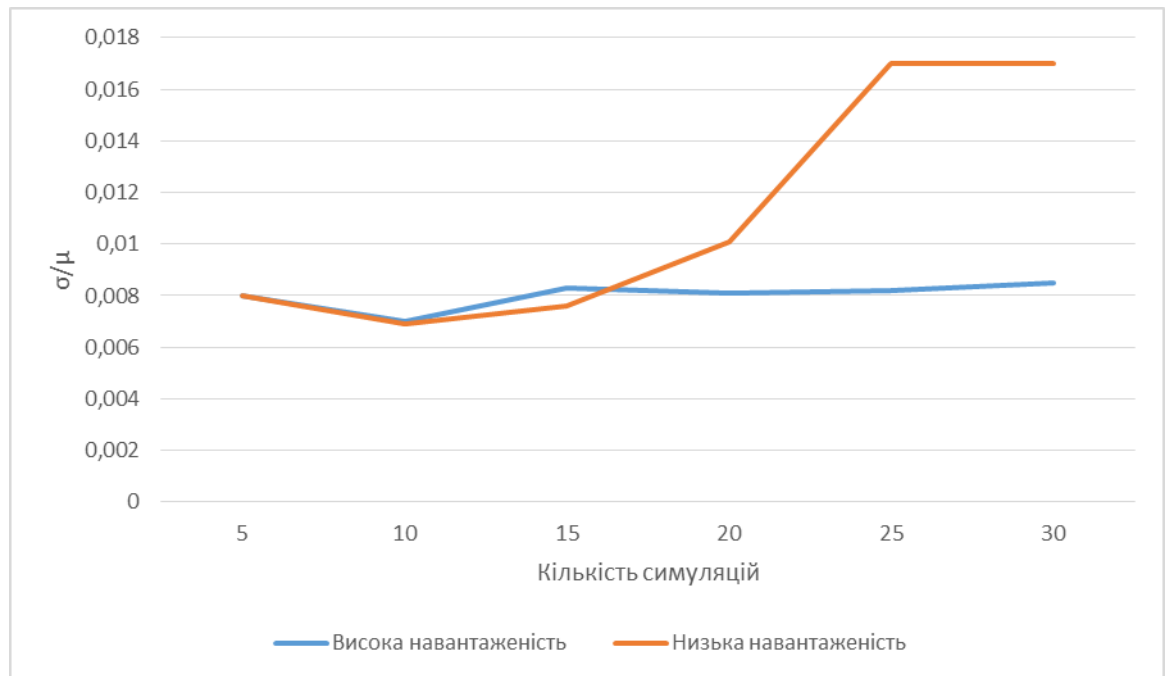


Рисунок 2.7 - Стандартне відхилення від середньої кількості активних користувачів, для високого та низького навантаження, для комбінацій носіїв із частотою 2600 МГц та 900 МГц.

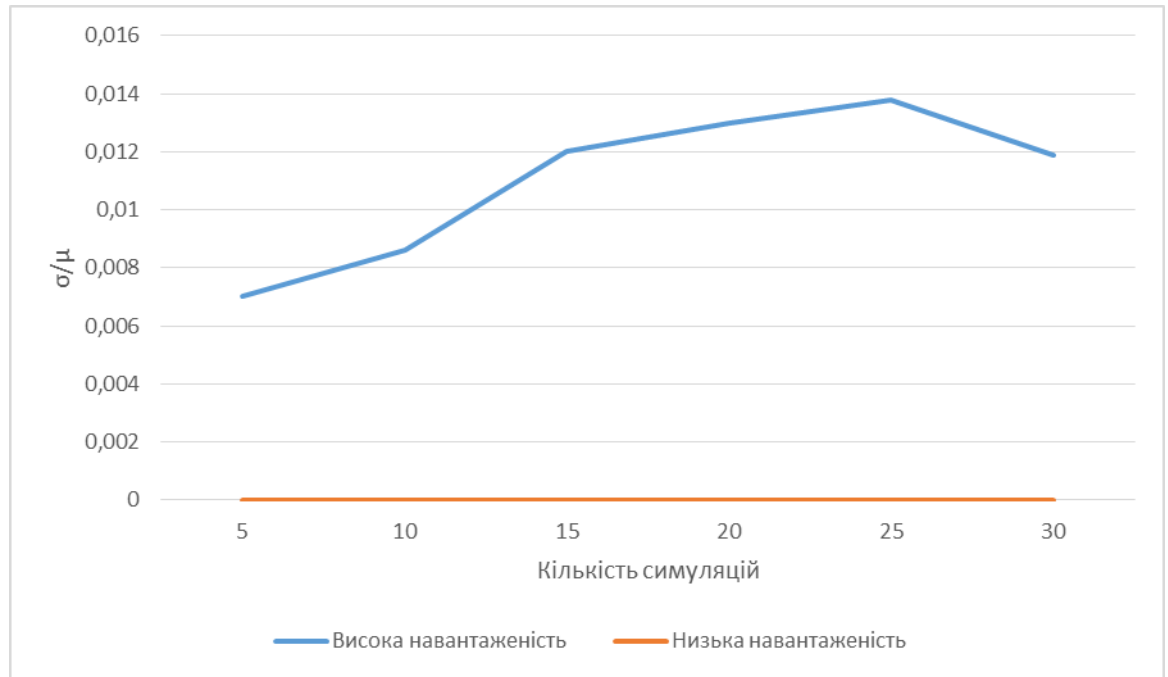


Рисунок 2.8 - Стандартне відхилення в середньому від кількості активних користувачів, для високого та низького навантаження, для комбінацій носіїв

Щоб підтвердити, що мережа здатна забезпечити максимальну пропускну спроможність, було виконано кілька моделювань, враховуючи лише один UE в мережі. Користувач був дуже близьким до eNB, який обслуговував його, і зміг досягти 99,44 Мбіт/с та 101,11 Мбіт/с, використовуючи 84 RBs, які дуже близькі до теоретичних значень пропускнуї спроможності для терміналу категорії 3 (максимальна теоретична пропускна здатність 100 Мбіт/с) . Якщо розглядати термінал категорії 4, то максимальна теоретична пропускна спроможність буде дорівнювати 150 Мбіт/с, однак вона не досягається, оскільки симулятор не враховує максимальну швидкість кодування для схеми модуляції 64QAM, щоб мати гарне наближення поведінки реальної мережі. Тому максимальна пропускна здатність, досягнута симулятором, відповідає близько 120Мбіт/с.

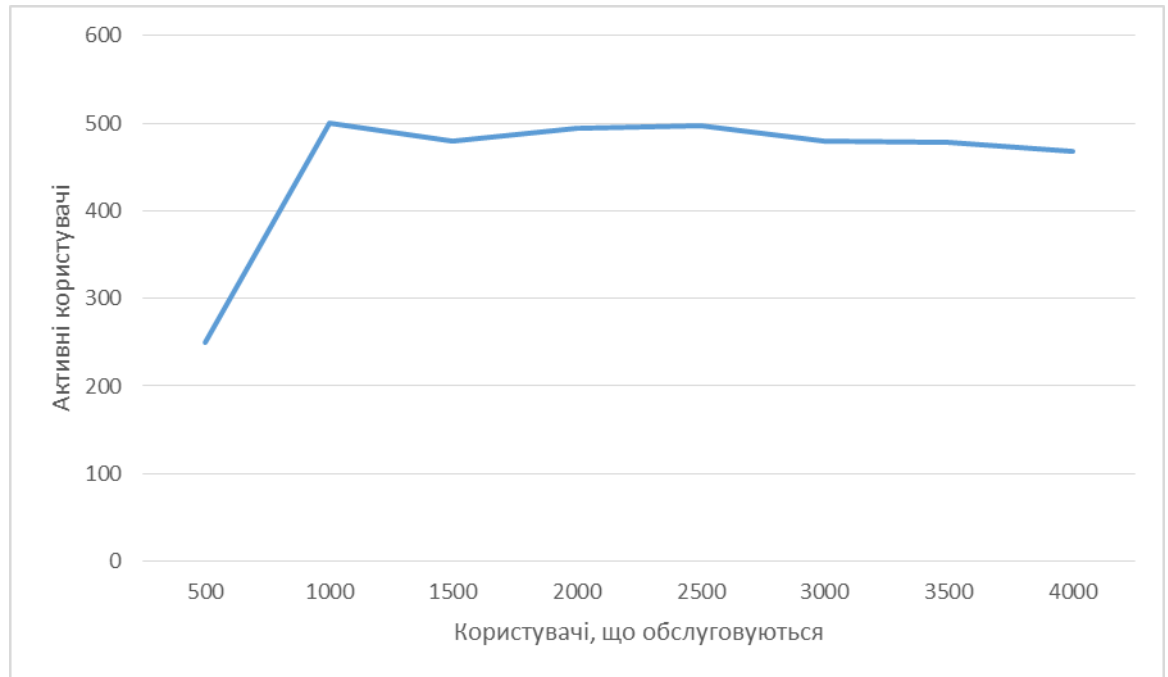


Рисунок 2.9 - Кількість обслуговуваних користувачів по відношенню до активних користувачів у мережі.

Що стосується динамічної поведінки мережі, то на рисунку 2.10 показано аналіз загального навантаження на одну годину моделювання після закінчення періоду ще однієї години, так що представлені результати показують стійкість навантаження в мережі протягом години. Оскільки в усіх сценаріях спостережувана поведінка була дуже схожою, на рисунку 2.10 представлена ця оцінка лише для одного сценарію, в якому існуючі носії мають 2600 МГц та 1800 МГц. Точки, представлені на рисунку 2.10, не відповідають одній секунді, тому що в іншому випадку інформація не буде розшифрована через накладання барів стандартного відхилення, тому для виконання зразків потрібно 25 секунд.

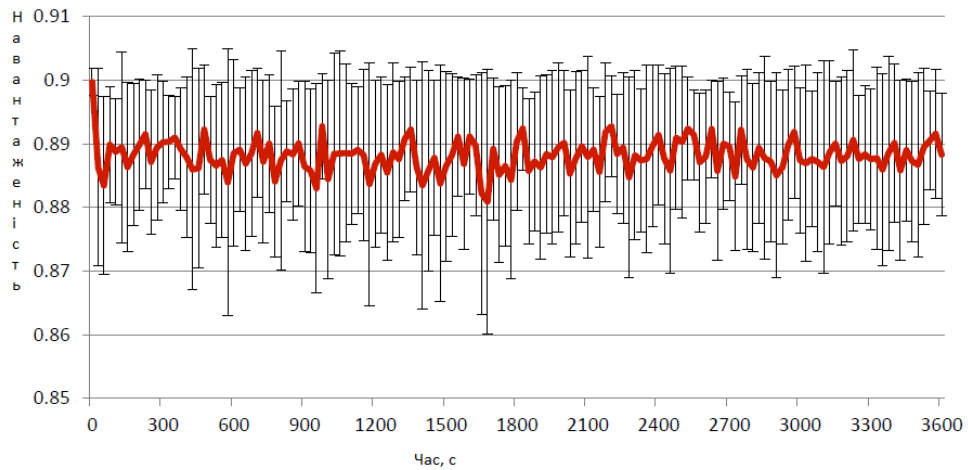


Рисунок 2.10 - Напруга навантаження мережі протягом однієї години, беручи до уваги лише носії 2600 МГц та 1800 МГц (сценарій 1).

Оцінка моделі також проводиться за допомогою порівняння між результатами, отриманими при моделюванні та зібраних вимірах під час прогулянкових тестів. Для цього визначається наступна відносна помилка, приймаючи результати вимірювань як еталон:

$$\varepsilon_r = \frac{V_{simulation} - V_{measurement}}{V_{measurement}} \times 100\% \quad (2.13)$$

де:

- $V_{simulation}$: Значення, отримане від симулятора;
- $V_{measurement}$: Значення, отримане від вимірювань.

Висновки до розділу 2

1. Проаналізовано політики керування компонентами мережі та виявлено, що тісна політика управління є більш ефективною з точки зору якості обслуговування порівняно вільною політикою.

2. На основі проведеного аналізу розроблено підхід до балансування навантаження, який відрізняється від існуючих використанням інтерчастнотного хендоверу, що дозволяє йому бути орієнтованим на надання найкращої пропускної спроможності користувачам, беручи до уваги їх позицію відносно передавальної антени, а також пріоритету послуг, що використовуються.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У цьому розділі містяться відомості про результати, отримані від моделювання та проходження тестів, проведені в місті Київ. Перша частина описує сценарії, які розглядаються в цій роботі. Пункт 3.2 містить аналіз сценарію високого завантаження. Вивчення мережі в умовах низької завантаженості, представлені у розділі 3.3. У заключному пункті цього розділу розглядаються результати, отримані від вимірювань, здійснених у декількох районах в умовах різних сценаріїв.

3.1 Опис сценаріїв для тестування в місті Київ

Для тестування використовується місто Київ, оскільки воно представляє собою міське середовище з великою різноманітністю розподілу користувачів і послуг, де LTE реалізується в зоні з високою щільністю користувачів та eNBs, деякі з них мають дві операційні частоти несучих. Оскільки в Києві впровадження частот 1800МГц планується в липні 2018 року, дата впровадження 900 частоти ще не визначена, для теоретичного аналізу цих частот та розробленого методу міжчастотного хендоверу будемо використовувати систему моделювання, описану в 2.4.

Збиток від траєкторії розраховується за допомогою моделі розповсюдження COST 231 Walfisch-Ikegami та параметрами, наведеними в таблиці 3.1. Значення параметрів представлені для щільних міських сценаріїв, на основі [22] та спостереженнях міста Київ. Висота UE - це точка, підтверджена під час вимірювань, що виконуються в місті Київ, оскільки вона відповідає середній висоті UE серед різних людей, що мають своє обладнання, у звичайній позиції використання даних.

Таблиця 3.1 - Налаштування параметрів моделі COST 231 Walfisch-Ikegami.

Параметр	Значення
Висота передавача антени (м)	25
Висота будівель (м)	21
Ширина вулиці (м)	30
Відстань між центрами будівель (м)	50
Кут падіння (°)	90
Висота UE (м)	1.2

Розглядаються три діапазони частот, кожен з яких пов'язаний з максимальною доступною пропускнуою спроможністю:

- діапазон 900 МГц (з відповідною смугою пропускання 10 МГц), що забезпечує високий рівень охоплення і, отже, може постраждати від високих міжкоміркових перешкод;

- смуга частот 1800 МГц (з відповідною смугою 15 МГц), що забезпечує високу місткість у містах та сумісність з широким спектром пристроїв;

- смуга частот 2600 МГц (з відповідною смугою пропускання 20 МГц), що забезпечує високу ємність.

Об'єднавши дві з цих трьох частотних діапазонів, три різних сценарії визначаються як розгортання спільно розташованих смуг, ці комбінації виражаються як:

1. Сценарій 1 для позначення поєднання 2600 МГц з діапазонами частот 1800 МГц;

2. Сценарій 2, який розглядає спільне розташування 2600 МГц з частотними діапазонами 900 МГц;

3. Сценарій 3, який визначає розміщення діапазонів частот 1800 МГц та 900 МГц на спільному місці.

Інші параметри моделювання показані в таблиці 3.2. Що стосується характеристик поширення, то швидкість затухання не враховується, і, хоча UMTS використовує це за рахунок швидкого регулювання потужності, LTE це не робить. Вважається, що запас при повільному затуханні базується на [1].

Розглянутий трафік складається з VoLTE і спільних користувачів даних (називають FTP-користувачів), визначаючи пріоритет першого типу, оскільки вони мають більш строгі вимоги щодо затримки. Мінімальна та бажана пропускна спроможність, що враховуються, становить 12,2 Кбіт/с та 12,65 Кбіт/с відповідно для користувачів VoLTE, тоді як для користувачів FTP мінімальна пропускна спроможність встановлена до 1,024 Мбіт/с та бажана пропускна спроможність до 100 Мбіт/с. Вибрані значення визначаються відповідно до інформації, наданої в [22, 24, 25], враховуючи використання типових бітових кодів адаптивного багатотарифного (AMR) мовного кодека, які забезпечують якість передачі голосу через виклик, для VoLTE користувачам, а також досягти підходу, подібного до результатів вимірювань проходження тестів для користувачів FTP.

Таблиця 3.2 - Симуляційні параметри

Параметр	Значення		
Частотні діапазони (МГц)	900	1800	2600
Максимальна пропускна спроможність (МГц)	10	15	20
Вихідна потужність передавача (dBm)	44.7		
Виграш антени UE (dBi)	1		

Продовження таблиці 3.2	
Модуляції	QPSK, 16QAM, 64QAM
Конфігурація антени	2x2
Електричний потяг (°)	5
Механічне пониження (°)	0
Втрати користувачів (dB)	1
Втрати кабелю (dB)	2
Значення шуму (dB)	7
Межа повільного затухання (dB)	8.8
Схема повторного використання частоти	Універсальне повторне використання частоти
Тип користувачів	EPA5

Для того, щоб вивчати та оцінити зв'язок між досягнутою пропускнуою спроможністю та отриманою потужністю, необхідно оцінити ці значення на різних наборах реалізацій. На рисунку 3.1 наведено приклад теоретичного наближення очікуваних кривих для трьох запропонованих частот несучих та трьох схем модуляції та кодування, які приймають [22]. Ці криві отримані з урахуванням єдиного користувача з усіма RBs, які йому заплановані.

Що стосується областей охоплення комірок, як зазначено в розділі 2.1, то ідеальний сценарій складається з кількох BSs з трьома несучими частотами в яких носії 1800 МГц та 900 МГц мають зони, що перекриваються між eNB.

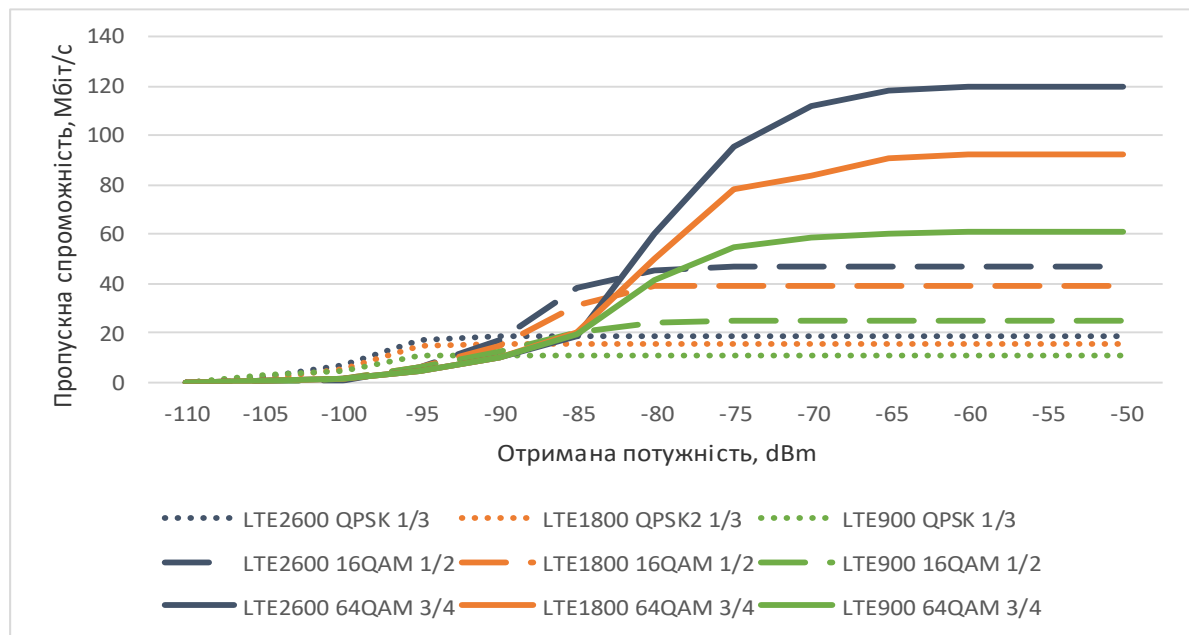


Рисунок 3.1 - Пропускна спроможність та прийнята потужність за різними схемами модуляції та кодування

Вимірювання, отримані в ході тестів, проведені у декількох районах міста Київ, призначені для надання оновленої інформації про існуючу мережу і, таким чином, дозволяють порівнювати зібрані значення з результатами моделювання. Райони, де проводяться випробування разом з різними досліджуваними параметрами, представлені в розділі 3.4. У всіх зазначених регіонах є більш висока щільність eNBs, що забезпечують охоплення з використанням частотного діапазону 2600 МГц (як зазначалось раніше, можливість реально протестувати два діапазони відсутня, так як запуск діапазону 1800 МГц планується лише на літо 2018 року), що виправдовує вибрані маршрути для тестів. Використання планшету та мобільних пристроїв з вмонтованими GPS-приймачами дали можливість зареєструвати інформацію про широту та довготу для кожного вимірюваного параметри UE, що використовується для випробувань, працює з 2×2 MIMO-конфігурацією і теоретично здатний досягти коефіцієнта 0,95 при використанні схеми модуляції 64-QAM і коли він знаходиться дуже близько до eNB. Тим не менш, хоча обладнання (теоретично) здатне досягти пропускну спроможності 150 Мбіт/с, це значення ніколи не було зареєстровано, а це означає, що або якість

отриманого сигналу була досить низькою, або інші UE вже запитували ресурси з мережі. UE виконували завантаження файлів FTP з серверів Kyivstar, а виміряні значення були зареєстровані в програмному забезпеченні для вимірювання, що працює на вказаних пристроях, зокрема смартфон ASUS ZenFone MAX 3 з 4-м стандартом.

Середня висота UE під час тестів становила приблизно 1,20 м над землею, що відповідає типовому використанню смартфона, коли користувач запитує звичайне з'єднання даних.

Що стосується швидкості UE, то вона спрямована на підтримку звичайної швидкості від 3 до 4 км/год. Це було зроблено так, щоб швидкість залишалася максимально наближеною до тієї, яка відповідає сценарію EPA5, який розглядається в моделюванні.

Як вже згадувалося раніше, в цьому розділі райони, в яких проводилися тести, були відібрані через існування електронних бібліотек, в яких працювала частотна смуга 2600 МГц, що дозволило вивчити деякі сценарії, розглянуті в моделюванні, і, отже, дозволяючи порівнювати обидва отримані результати для подібних сценаріїв. Кожний з представлених районів був протестований в сценаріях різних типів навантаження, що представляли собою низький рівень заселення, звичайний міський та ситуації, при яких щільність місцезнаходження UE занадто перевищує норму.

Зібрані виміри показують, що під час проходження тестів використовувався значний обсяг ресурсів, оскільки кількість RB, виділених для UE, досить низька, в більшості випадків навіть у ситуаціях, коли умови радіозв'язку є сприятливими для встановлення зв'язку. Потім були зроблені зусилля, щоб найкращим чином копіювати цей сценарій у симуляторі, щоб забезпечити узгоджене порівняння результатів моделювання та зібраних вимірювань. Для того, щоб забезпечити відповідний компроміс між кількістю користувачів та відповідним

генерованим навантаженням, а також комбінацією достатньої кількості користувачів із достатньою кількістю моделювання для забезпечення статистичної відповідності, в місті Київ було розміщено від 150 до 1200 користувачів. для 3-х різних сценаріїв навантаження.

Для подальшої оцінки моделей, впроваджених у симулятор, слід розглянути наступні розділи не лише як презентації отриманих результатів, але також як засіб порівняння результатів, отриманих від вимірювань, з результатами, отриманими при моделюванні. Як згадувалося раніше, параметри моделювання та середовища відповідають найкращому наближенню результатів тестів. Порівняні параметри в основному отримують потужність, SNR / SINR і пропускну здатність. Кожен з цих показників проводиться для трьох досліджуваних сценаріїв частотного діапазону та для двох ситуацій завантаження мережі, згаданих вище.

Відповідні похибки між вимірами та моделюванням отримують за допомогою (2.13). Мінус-варіації відповідають значенням вимірювання вище, ніж отримані в результаті моделювання, а позитивні значення відносяться до протилежного випадку. Крім того, слід враховувати, що порівняння виконуються лише для типових користувачів даних, оскільки тести розглядаються лише як завантаження файлів FTP, тому користувачі VoLTE не порівнюються.

3.2 Аналіз при високому навантаженні

Результати, представлені в цьому розділі, стосуються аналізу мережі для 1200 користувачів у симуляторі. Ці результати стосуються переважно розподілу генерованого навантаження по всій мережі, а також кількості активних користувачів, середній SINR, середньої отриманої потужності, середньої кількості виділених RB і середньої пропускну здатності для кожного розглянутого сервісу та для кожного сценарію, визначеного в попередньому розділі.

На рисунку 3.2 можна спостерігати загальний розподіл навантаження між різними частотними діапазонами. Беручи до уваги те, що смуги більш високої частоти містять більшу кількість доступних RBs, не дивно, що смуга 2600 МГц містить більше навантаження, ніж 1800 МГц або 900 МГц (для сценаріїв 1 та 2 відповідно) і що 1800 МГц дотримується тієї самої поведінки порівняно з 900 МГц у сценарії 3. Крім того, користувачі, як правило, з'єднані з більш високими частотними діапазонами, оскільки вони здатні запропонувати кращу якість сигналу, ніж та, яку пропонують нижчі. Обидва ці спостереження узгоджуються з представленим розподілом навантаження. Більш того, представлені стандартні бар'єри відхилень показують, що ця поведінка перевірена для всіх моделювань, що доводить, що, хоча деякі імітовані параметри є стохастичними, мережа здатна послідовно розподіляти навантаження між різними носіями. Це також підтверджується перевіркою сумарного існуючого навантаження на мережу, яке завжди дуже близьке до 0,9.

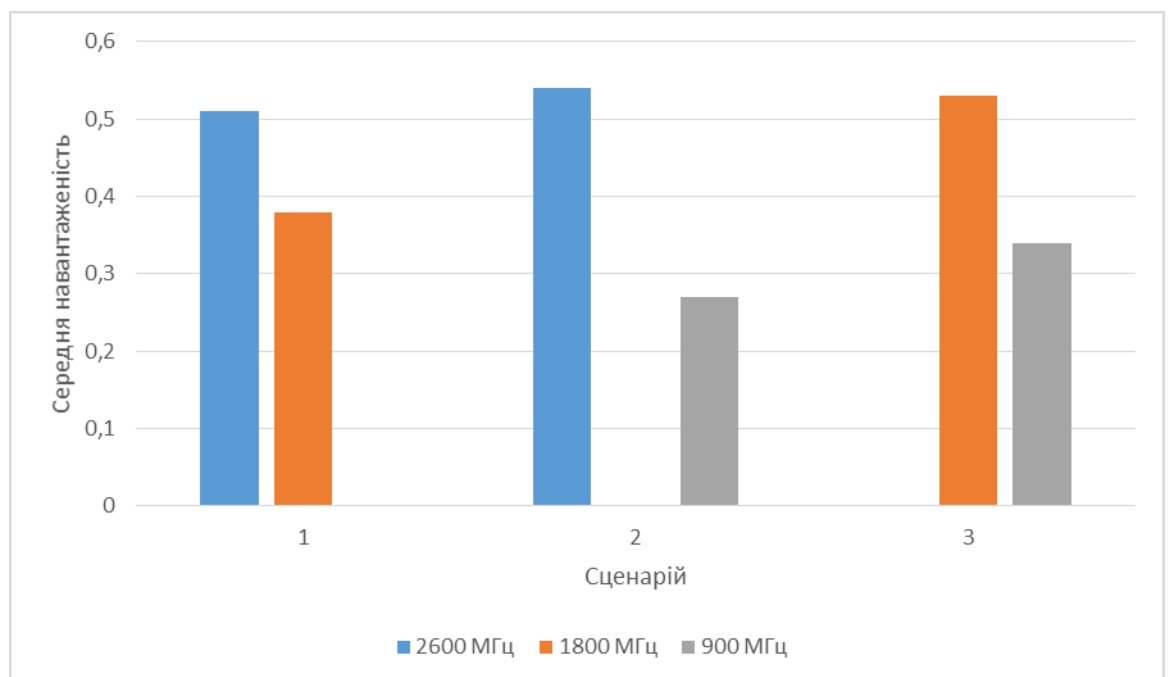


Рисунок 3.2 - Розподіл навантаження в кожній смузі частот для трьох визначених комбінацій носіїв

Іншим важливим результатом, який слід спостерігати, є розподіл навантаження за запитом служби за кожним сценарієм. На рисунку 3.3 показано навантаження, пов'язане з користувачами FTP та VoLTE, і, як очікується, перші з них відповідають за більшість згенерованого навантаження, оскільки необхідні ресурси для задоволення вимог до такого типу сервісу набагато вищі, ніж ті, які використовуються для VoLTE сервісу.

На рисунках 3.4 та 3.5 показано розподіл навантаження для служб FTP та VoLTE, відповідно, але поділено на кожний з розглянутих сценаріїв. Знову ж таки, можна побачити, що смуги більш високої частоти містять більше навантаження, ніж нижчі, як очікувалося. Симулятор враховує, що користувачі повинні бути підключені до частотного діапазону, здатного забезпечити кращу швидкість передачі даних, тому в сценаріях 1 і 2 група 2600 МГц відповідає за обробку більшої навантаження, ніж відповідно 1800 МГц та 900 МГц, а в сценарії 3 така ж поведінка також перевірена, але для діапазону частот 1800 МГц порівняно з 900 МГц. Представлені результати узгоджуються з даними на попередньому рисунку, оскільки завантаження FTP досягає значно більших значень, ніж еквіваленти для користувачів VoLTE.

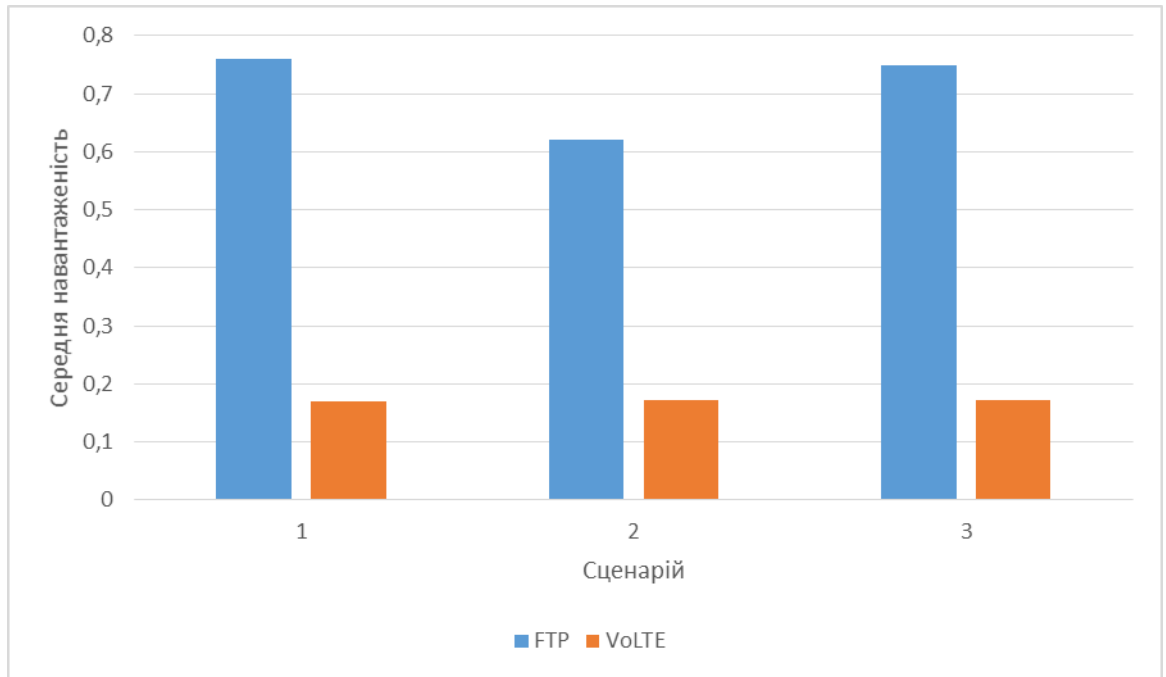


Рисунок 3.3 - Розподіл навантаження для кожного типу послуг для трьох визначених комбінацій.

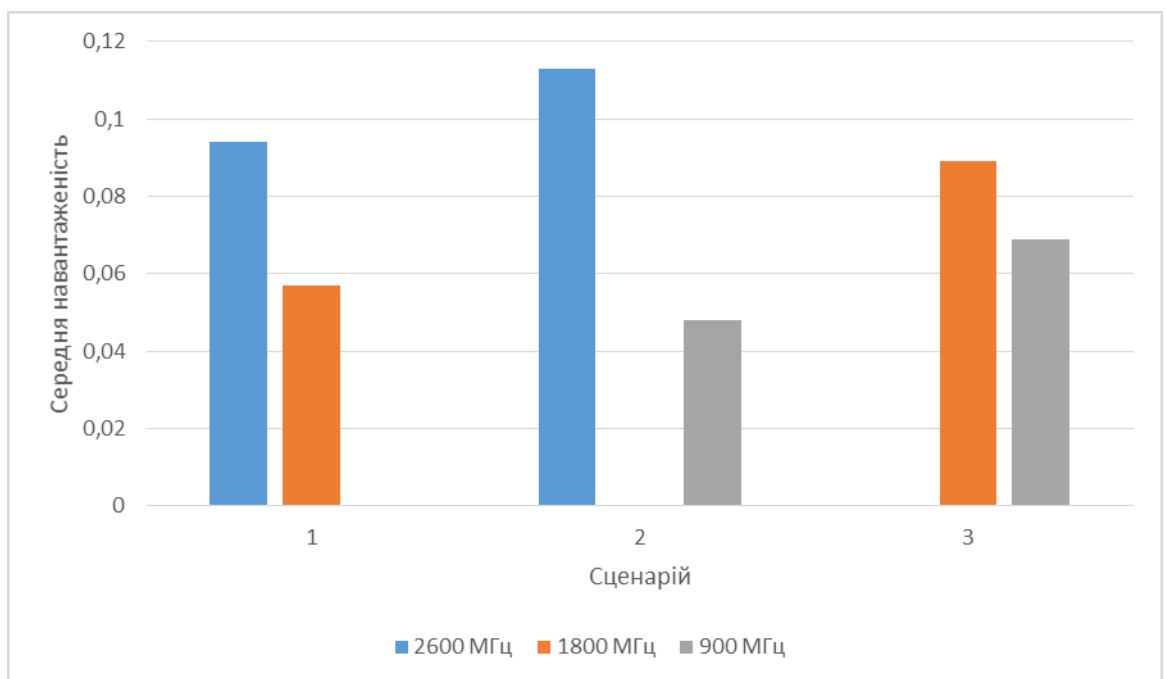


Рисунок 3.4 - Розподіл навантаження для трьох визначених комбінацій для користувачів FTP.

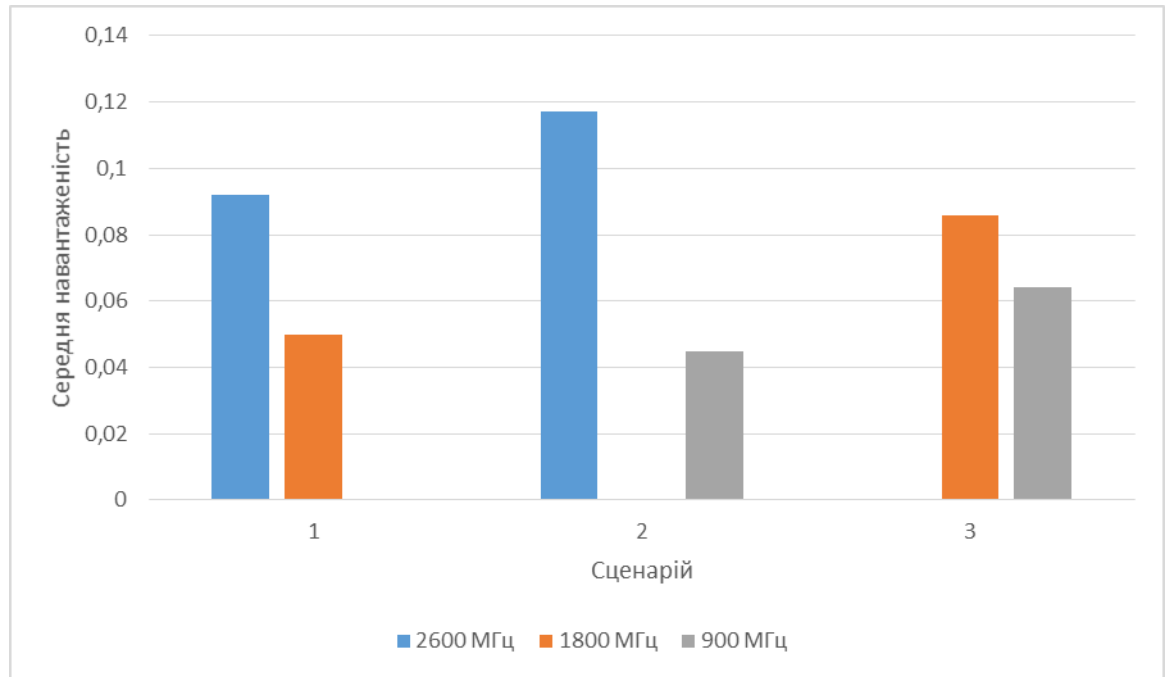


Рисунок 3.5 - Розподіл навантаження для трьох визначених комбінацій для користувачів VoLTE.

Тим не менше, слід мати на увазі, що служба VoLTE визначена з більш високим пріоритетом, тому очікується, що користувачі, що запитують цей тип послуг, спочатку розподіляються на смуги вищих частот.

На рисунку 3.6 показано кількість активних користувачів FTP та VoLTE для кожного сценарію, і результати дозволяють підтвердити, що більша кількість користувачів VoLTE обслуговується, головним чином через низьку кількість RBs, які вони потребують для задоволення бажаної пропускної спроможності, а також за пріоритетом їхньої служби.

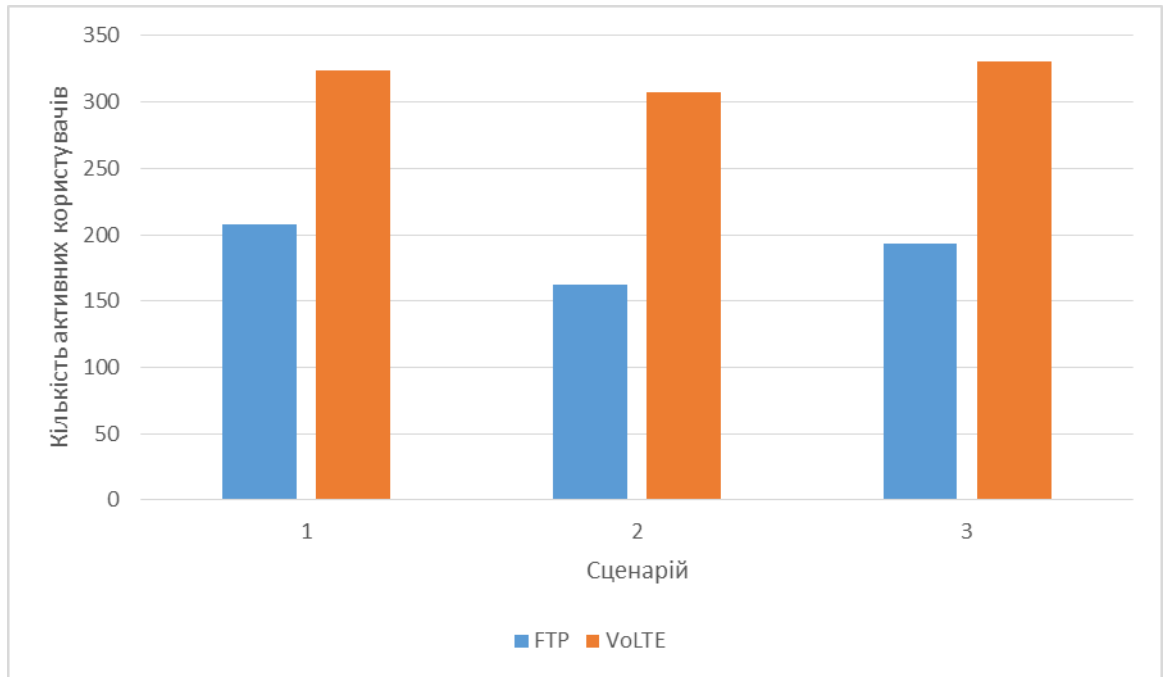


Рисунок 3.6 - Кількість активних користувачів за типами послуг для трьох визначених комбінацій

Рисунок 3.7 також показує кількість активних користувачів серед різних розглянутих сценаріїв, однак, він показує, як алгоритм розподіляє їх між існуючими діапазонами частот. Перший результат, який потрібно помітити, полягає в тому, що для більш високих частот поширюється більше користувачів, ніж на нижні. Це результат реалізованого алгоритму, який лише враховує, що користувачі розташовуються в смузі частот, з якими вони спочатку підключені, і, завдяки встановленню пріоритетів у смугах підвищеної частоти, це може мати наслідки з точки зору досягнутої швидкості передачі даних, що представлено далі в цьому розділі. Однак, як показано в попередньому аналізі з рисунка 3.6, більшість користувачів, які встановлюють зв'язок з діапазонами більш високих частот, є користувачами VoLTE, оскільки їх пріоритет обслуговування є найвищим, щоб краще захистити їх QoS.

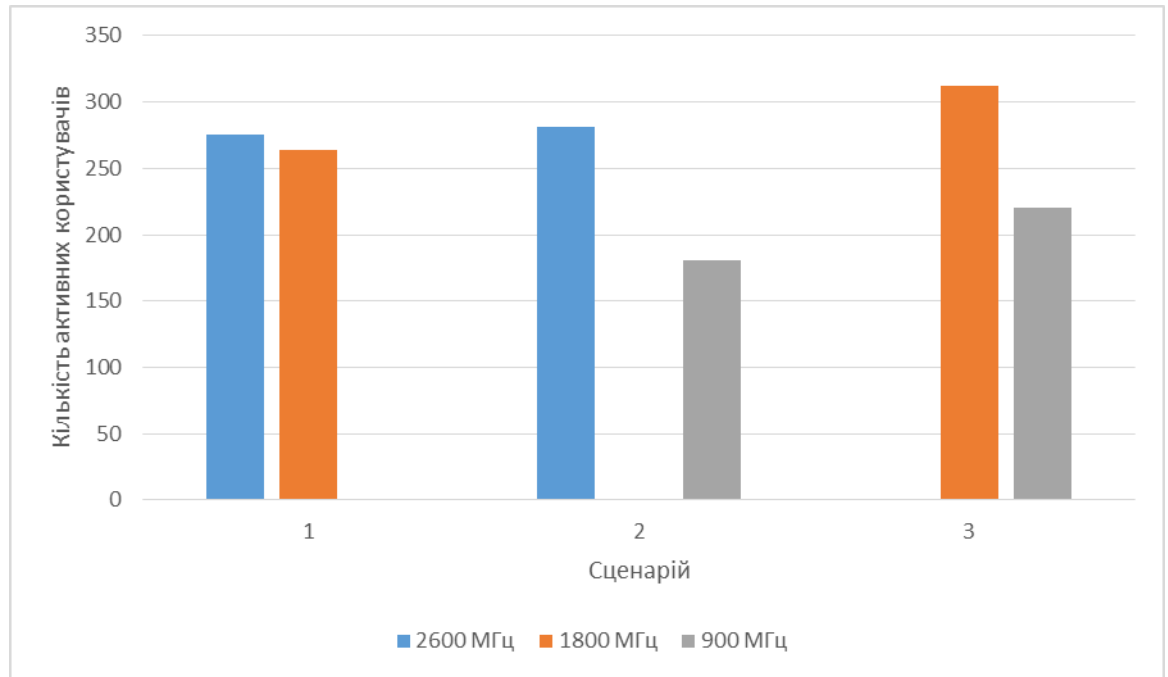


Рисунок 3.7 - Кількість активних користувачів за смугою частот для трьох визначених комбінацій

Вивчення отриманої потужності для кожного сервісу представлено на рисунках 3.8 та 3.9, відповідно. Це показує, що отримана потужність глибоко пов'язана з типом послуги, що запитується, що є наслідком кількості RBs, виділених для кожного користувача: чим більше розподілених ресурсів для користувача, тим вище буде отримана потужність. Це означає, що отримані результати для користувачів VoLTE, як очікується, будуть нижчими, ніж для користувачів FTP, оскільки кожна RB передає певну потужність. Інші фактори, які впливають на ці результати - це, наприклад, відстань від обслуговуючого сектора та ситуація LoS UE.

З огляду на результати, отримані для користувачів FTP, слід припустити, що відстань, врахована для розрахунків отриманої потужності для цих користувачів, досить низька, оскільки мережа складається тільки з набору з шести eNBs, що дає можливість мати вищі значення для прийнятої потужності через високу ймовірність того, що користувач розміщений дуже близько до обслуговуючої антени. Також це розподіл

eNBs призводить до більшої ймовірності виникнення LoS, що також може відображати приріст у прийнятій потужності. З іншого боку, симулятор не розглядає всі нерівності місцевості міста, тому ймовірність виникнення LoS повинна бути більшою, ніж очікувалося, посилюючи згадане раніше вплив на отриману потужність.

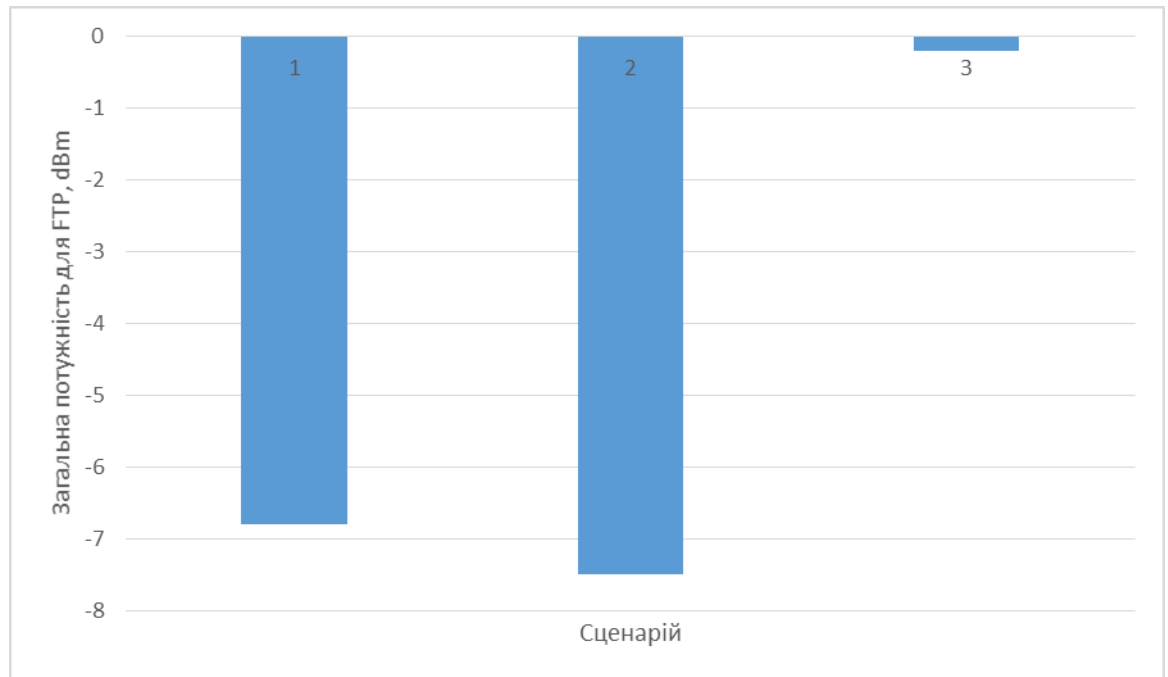


Рисунок 3.8 - Середнє значення отриманої потужності для користувачів FTP для трьох визначених комбінацій

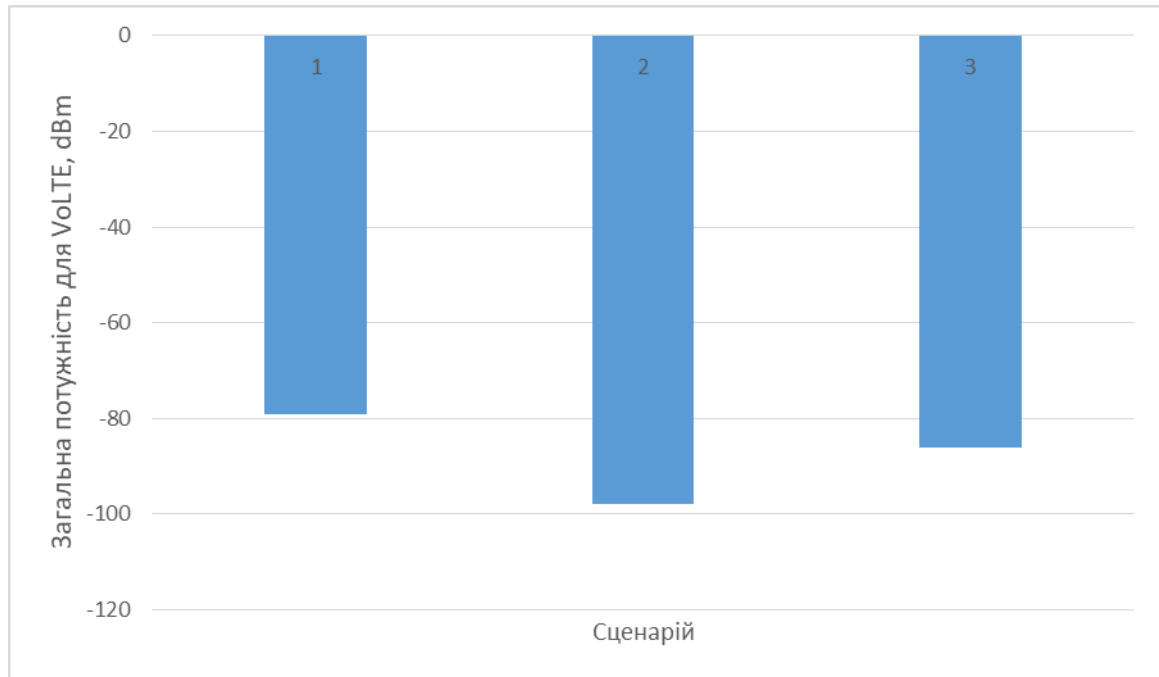


Рисунок 3.9. Середня потужність для користувачів VoLTE для трьох визначених комбінацій

Ще до аналізу отриманої потужності, рисунок 3.10 дає можливість вивчати цей параметр для різних існуючих частотних діапазонів. Можна помітити, що в 900 МГц отримувана потужність досягає найнижчих значень, що не повинно бути несподіванкою, оскільки ця частотна діаграма здатна забезпечити більш широку зону покриття, а це означає, що деякі користувачі, підключені до цього оператора, можуть бути далі від основної антени. Що стосується низьких значень, пов'язаних із отриманою потужністю у смузі частот 2600 МГц, то необхідно знову взяти до уваги те, що трафік VoLTE є більш поширеним, і тому відповідає отриманим значенням, оскільки кількість RBs, пов'язаних з цією послугою, дуже скорочується, що призводить до зниження результатів для отриманої потужності.

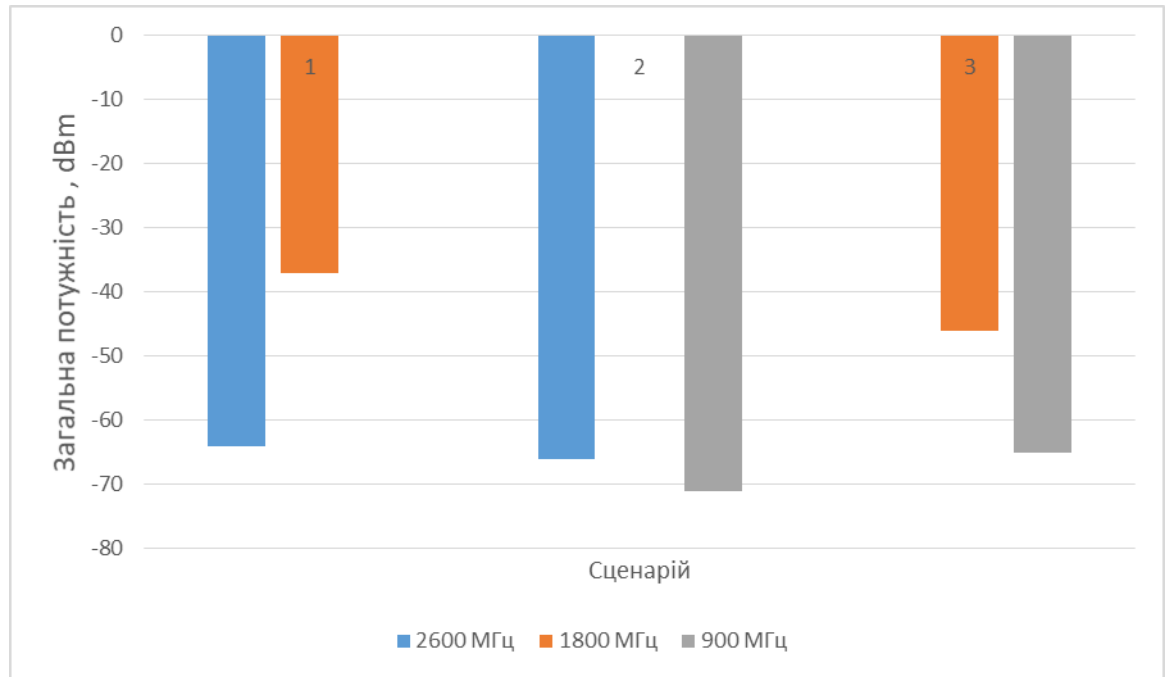


Рисунок 3.10 - Отримана потужність по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій

Інший результат для аналізу - це середній показник SINR. Як зазначено в підрозділі 2.2, цей параметр пов'язаний із отриманою потужністю, що означає, що поведінка обох цих параметрів повинна бути однаковою, як показано на рисунку 3.11. Крім того, ці результати враховують перешкоди, що означає, що якість сигналу погіршується внаслідок присутності інших користувачів, розподілені RB використовують таку ж частоту, що і ті, що використовуються даним користувачем. Кількість користувачів, присутніх в мережі, і зменшений розмір, тоді мають велике значення для досвідченого SINR, що призводить до досягнення низьких значень, таких як ті, що представлені на рисунку нижче.

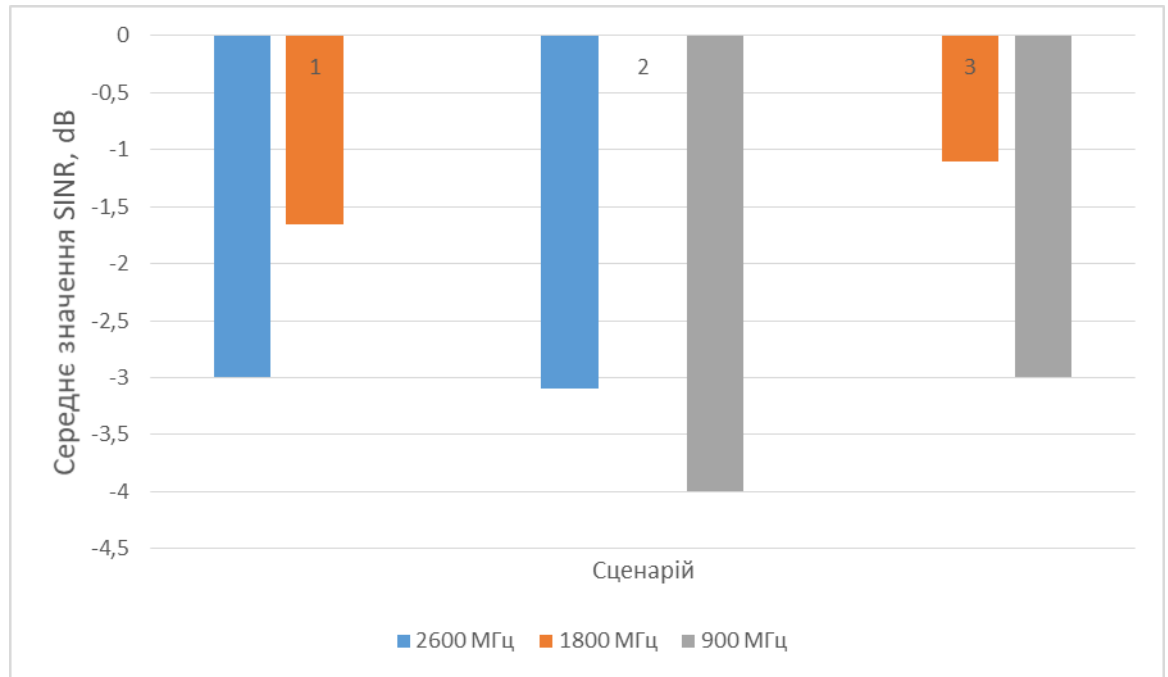


Рисунок 3.11 - Середня SINR по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій

Аналіз SINR також проводиться для кожного типу послуг у різних розглянутих сценаріях, як показано на рисунках 3.12 та 3.13. Представлені результати показують, що користувачі VoLTE, як правило, досягають нижчих значень для цього параметра в порівнянні з користувачами, які запитують FTP-сервіс, але, з іншого боку, і, посилаючись на виражені концепції SINR та отриману потужність, слід очікувати такої різниці між службами. Оскільки користувачі FTP вимагають більшої кількості RBs, щоб задовольнити їх вимоги до обслуговування, то більшою буде отримана потужність і, таким чином, SINR.

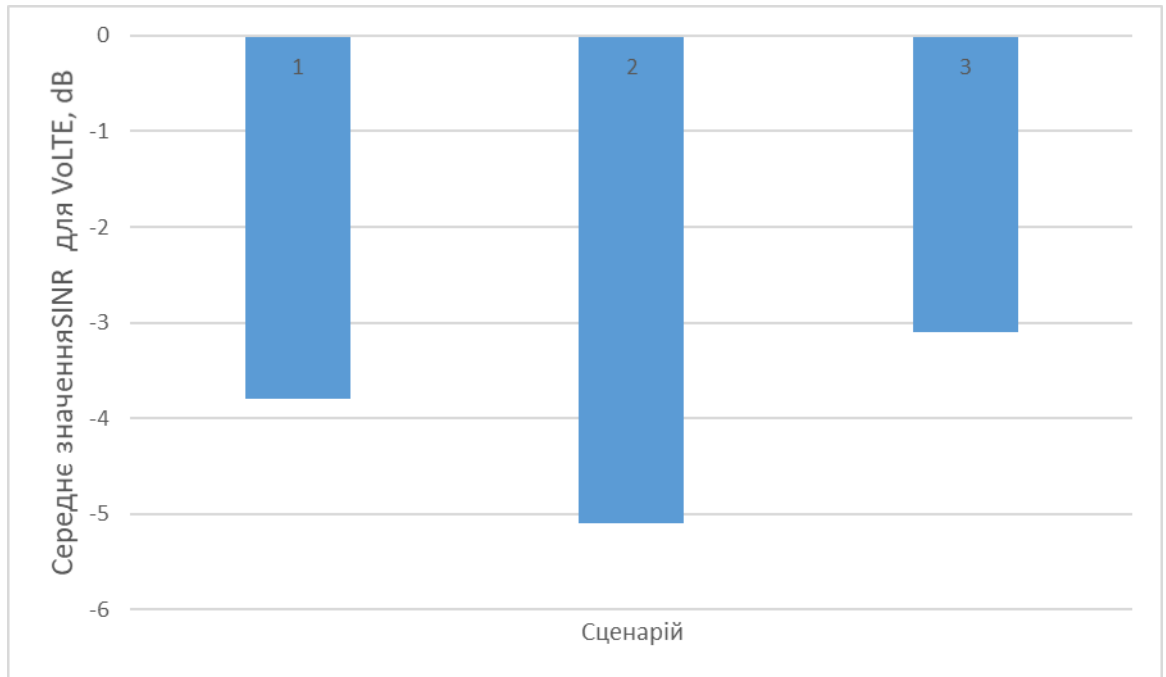


Рисунок 3.12 - Середня SINR для користувачів FTP для трьох визначених комбінацій

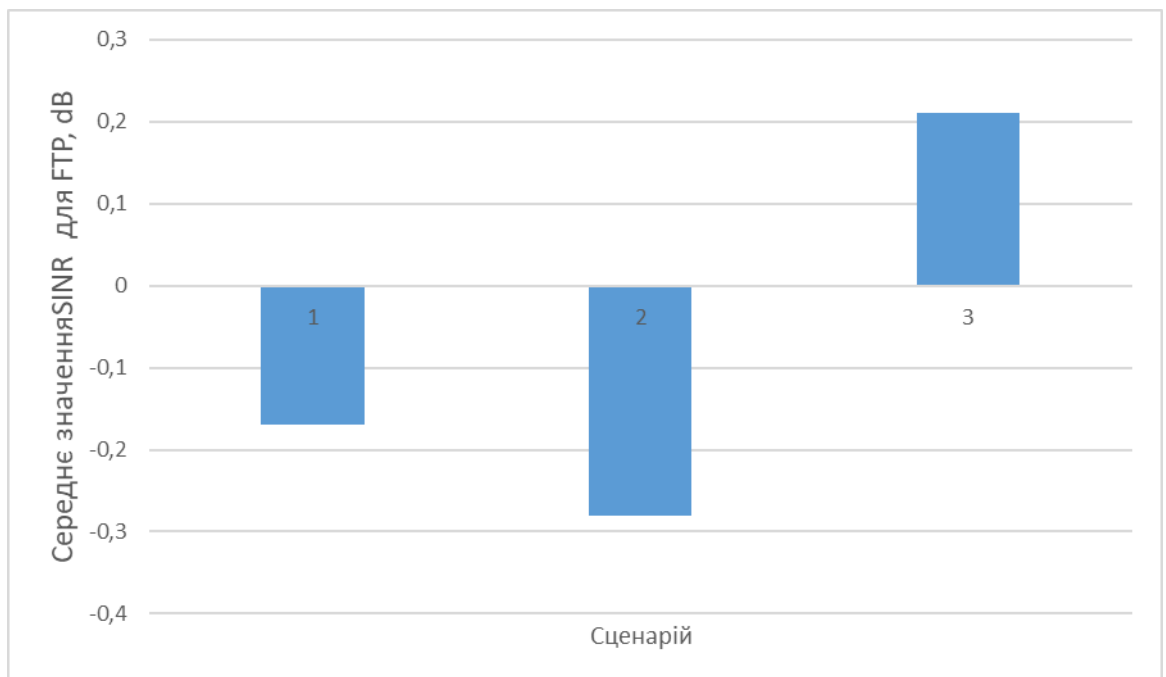


Рисунок 3.13 - Середня SINR для користувачів VoLTE для трьох визначених комбінацій

Нижче представлений аналіз стосується середньої пропускнуєї спроможності, але тільки для користувачів FTP. Вивчення того ж

параметру для користувачів VoLTE не представлено на рисунку, оскільки вимоги до такого типу послуг визначаються голосовими кодеками, які використовуються для його виконання, і лише вимагають, щоб швидкість передачі даних залишалася від 12,2 до 12,65 Кбіт/с, як зазначено в розділі 3.1. Тим не менше, ці результати також були ретельно вивчені і можна було підтвердити, що досвідчена пропускна здатність була, в середньому, між попередньо встановленими значеннями.

Аналіз середньої пропускної спроможності користувачів FTP показаний на рисунку 3.14. Як зазначалося раніше, швидкість передачі даних для цього типу послуги не досягає високих значень, головним чином, через кількість активних користувачів у мережі та необхідний розподіл ресурсів, пов'язаних з ним. Впроваджений алгоритм зосереджується на пріоритезації смуг більш високих частот, тому очікуваний результат, що пропускна спроможність дійсно дуже низька, коли враховуються теоретично досяжні діапазони цього параметра. Іншим помітним результатом є той факт, що сценарій 3 забезпечує більш низькі середні швидкості передачі даних, оскільки ця комбінація частот є такою, що має найнижчу кількість доступних RBs через пов'язану смугу пропускання кожної з існуючих діапазонів частот.

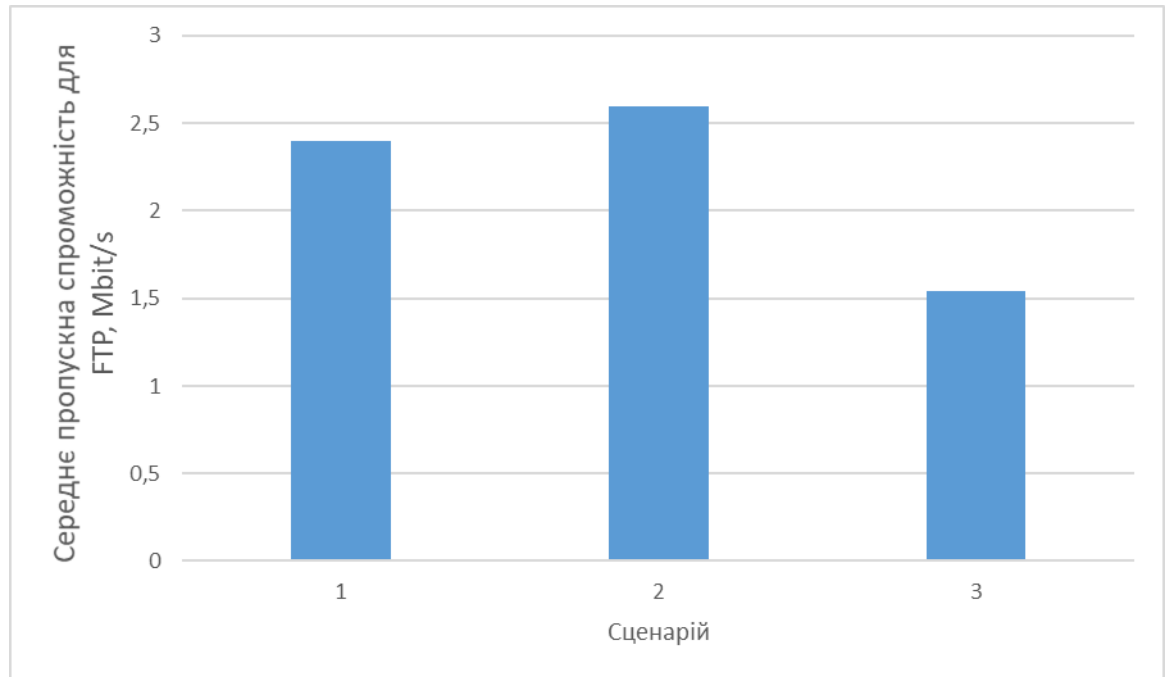


Рисунок 3.14. Середня пропускна спроможність для користувачів FTP для трьох визначених комбінацій

Наступним досліджуваним параметром є середня кількість виділених RBs для користувачів FTP, представлена на рисунку 3.15. Перший погляд на цей аналіз дозволяє легко підтвердити очікувану поведінку з точки зору розподілу RBs у кожній частотній смузі. Більше того, це також підтверджено для всіх сценаріїв з точки зору того, що смуги більш високих частот здатні забезпечити більшу кількість RBs через пов'язану смугу пропускання для кожного з них. З цієї цифри також можна помітити зв'язок між розподілом RBs користувача FTP та середньою пропускною спроможністю, яку він відчуває, оскільки більша кількість RBs, що виділяються користувачеві, являє собою збільшення його пропускної спроможності, така поведінка спостерігається як на рисунку, представленому нижче так і на рисунку 3.14.

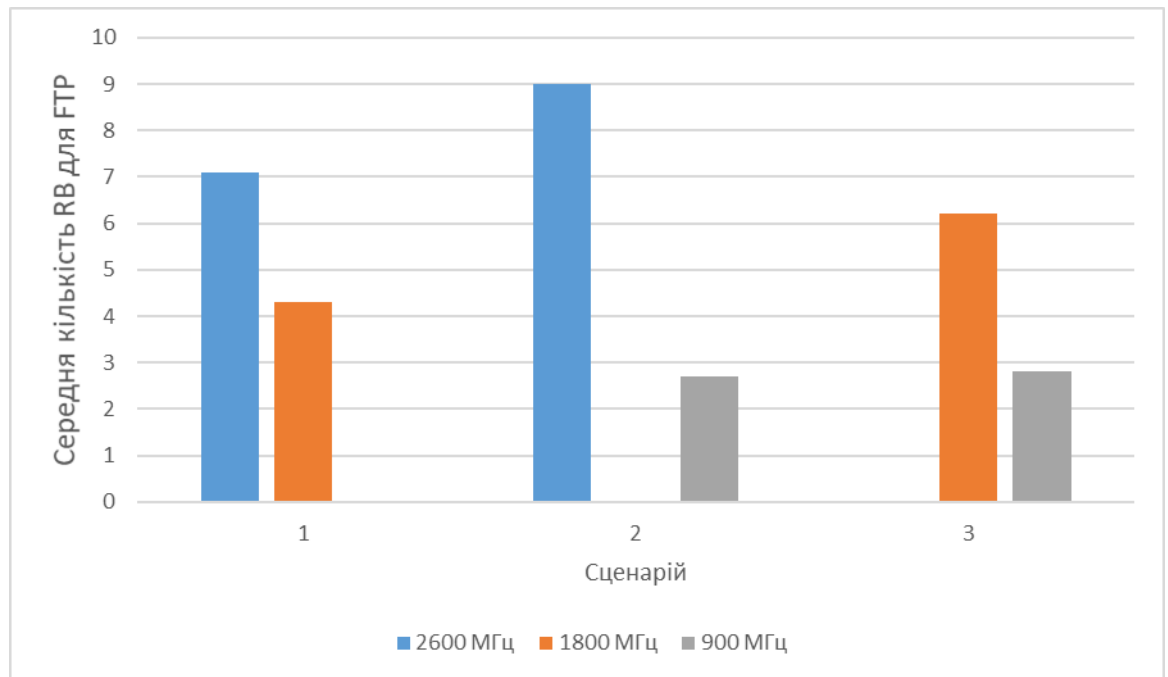


Рисунок 3.15 - Середня кількість виділених RBs для користувачів FTP у кожній смузі частот для трьох визначених комбінацій

Аналіз середньої кількості виділених RBs для користувачів VoLTE не проілюстрований у цій роботі з тієї ж причини, що цей параметр досить стабільний через низьку кількість RBs, необхідних для задоволення вимогливої пропускної спроможності для цієї послуги. Отже, наступний аналіз має виключно мету порівняти різницю між кількістю виділених RBs користувачів FTP та VoLTE, показуючи середню кількість виділених RBs для кожного типу послуг для кожного сектора. Тоді, за рисунком 3.16, можна ще раз підтвердити, що загальна кількість доступних ресурсів зменшується відповідно до частот, які розглядаються для кожного сценарію. Слід пам'ятати, що, хоча для користувачів FTP більше ресурсів, ніж для користувачів VoLTE, останній залишається більш високо пріоритетним, що призводить до більшої кількості таких користувачів.

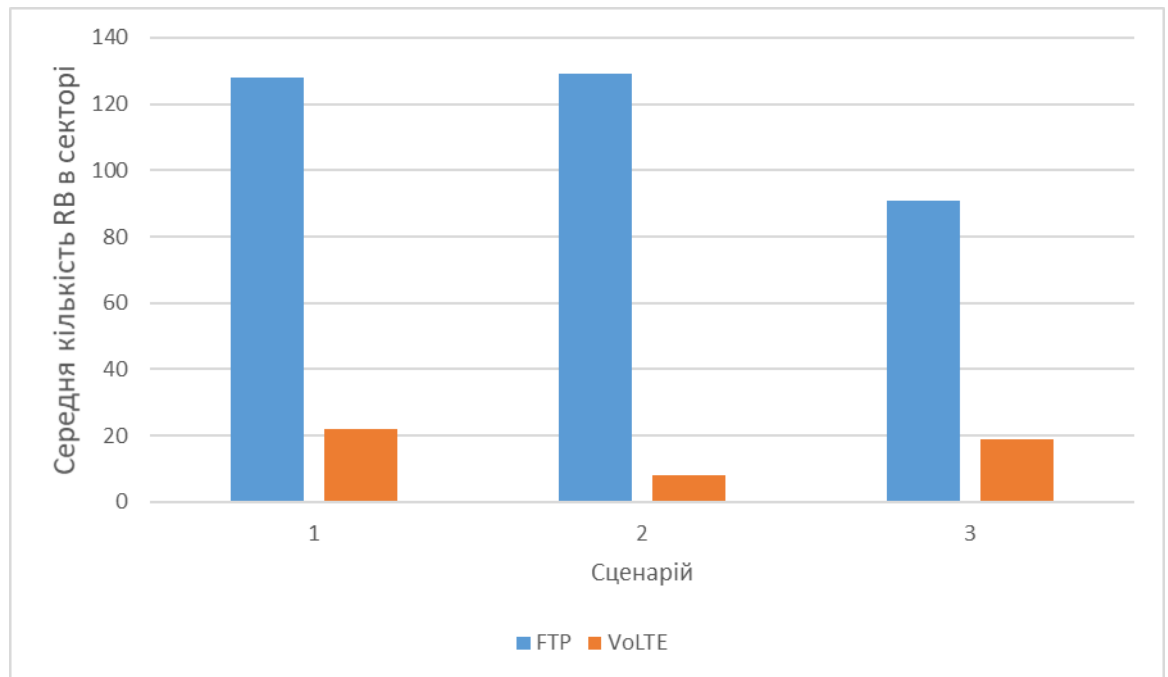


Рисунок 3.16 - Середня кількість виділених RBs у секторі за типом послуги, для трьох визначених комбінацій

3.3 Аналіз при низькому навантаженні

Нижче наведено результати, отримані симулятором, щодо аналізу мережі з урахуванням 200 користувачів. Представлені результати в основному стосуються розподілу генерованого навантаження по всій мережі, середньої кількості активних користувачів, середньої SINR, середньої отриманої потужності, середньої кількості виділених RBs і середньої пропускної спроможності для трьох сценаріїв, визначених у розділі 3.1.

Перший аналіз стосується розподілу навантаження між різними смугами частот, як показано на рисунку 3.17. Знову ж таки, можна побачити, що смуги більш високих частот складають більше навантаження, ніж нижні. Це є наслідком наявних ресурсів для кожного сценарія через їх пов'язану смугу пропускання та внаслідок визначення пріоритетів смуг більш високих частот на симуляторі. Можна також помітити, що стандартні відхилення зросли в порівнянні з сценарієм

високого навантаження, що є очікуваним результатом, оскільки кількість існуючих користувачів набагато нижча, ніж у попередньому аналізі, тобто з урахуванням того, що деякі параметри для користувачів є стохастичними, більш імовірно, що різні симуляції призводять до створення різних значень навантаження. Також, аналізуючи загальне породжене навантаження, можна сприймати, що воно також зменшується, що є наслідком меншої кількості існуючих користувачів у мережі. Крім того, це загальне навантаження на мережу досягає найвищих значень в сценарії 1, а потім сценарій 2 і, нарешті, сценарій 3, в результаті загальної кількості доступних ресурсів для кожної комбінації носіїв. Інший спостережуваний результат полягає в тому, що діапазон частот 1800 МГц досягає більших значень навантаження, що пояснюються тим фактом, що ця смуга має більш високу площу охоплення, ніж 2600 МГц, і тому здатна включати користувачів, які знаходяться далі від eNB, що породжує аналогічні значення навантаження, що спостерігаються для сценарію 1. Окрім того, оскільки реалізований алгоритм зосереджений на розподілі користувачів на смуги вищих частот, сценарій 3 показує, що навантаження діапазону смуги частот 1800 МГц досягає майже у два рази більшого значення, ніж 900 МГц, що означає, що більшість користувачів першої згаданої частотної зони покриваються і, відповідно, розподіляються на неї.

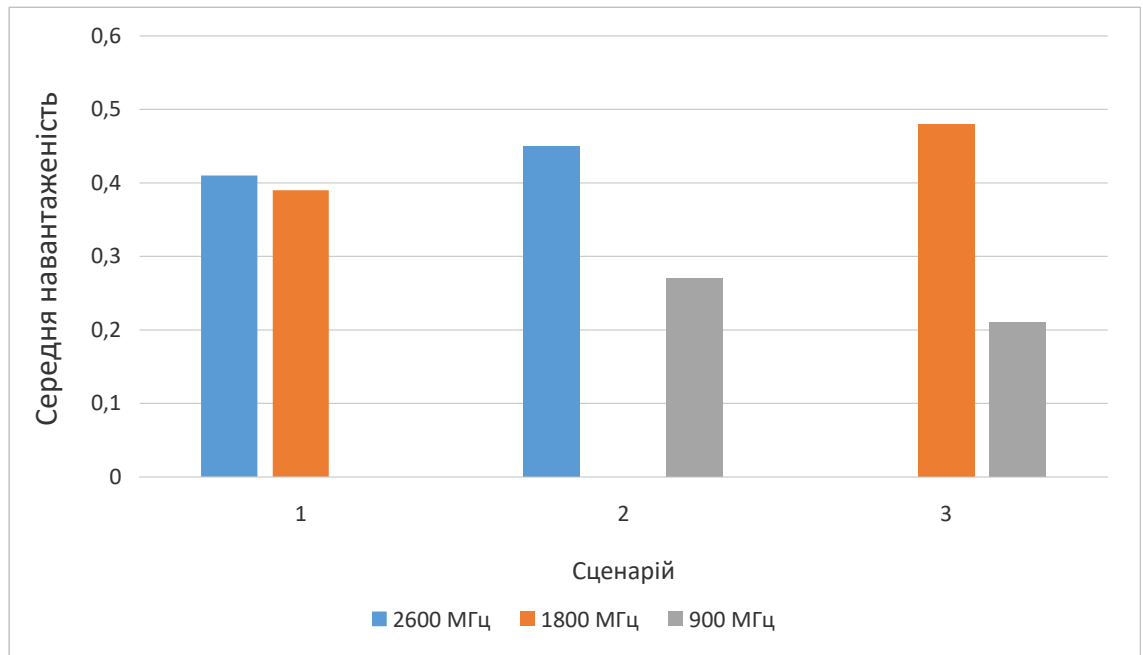


Рисунок 3.17 - Розподіл навантаження в кожній смузі частот для трьох визначених комбінацій

Цікаво також спостерігати розподіл навантаження між різними розглянутими послугами. На рисунку 3.18 можна побачити відповідні завантаження служб FTP та VoLTE, і спостерігати, що останній сприяє невеликій частці загальної навантаження, ще раз, оскільки ці користувачі ніколи не вимагають, щоб багато RBs відповідало їх вимогам, і нагадуючи, що загальна кількість розглянутих користувачів всього 200.

Що стосується користувачів FTP, то можна зробити три головні спостереження. Перше (виконання вищезазначеного результату) полягає в тому, що користувачам FTP потрібні додаткові ресурси для їх обслуговування, оскільки їх запитувана пропускна спроможність є найвищою з обох розглянутих служб. Далі можна підтвердити, що загальне навантаження на мережу в сценарії 1 вище, а потім сценарій 2, а потім сценарій 3, що є наслідком існуючих наявних ресурсів у кожному сценарії, як це було проаналізовано вище в цьому розділі. Нарешті, можна спостерігати збільшення стандартного відхилення в кожному сценарії, що є очікуваним результатом, який узгоджується з областями охоплення

кожного сценарію, що означає, що більше користувачів можуть обслуговуватися, але їх радіостанції зазнають більших варіацій, що призводить до представлених відмінностей у відповідному навантаженні.

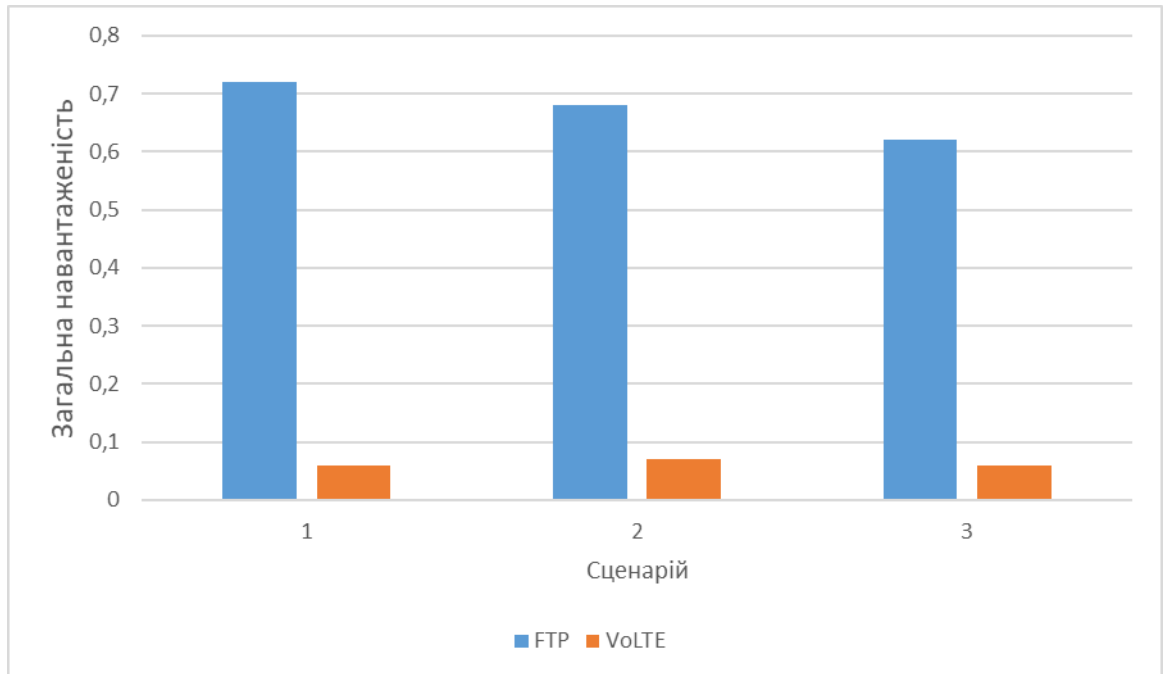


Рисунок 3.18 - Розподіл навантаження для кожного типу послуг для трьох визначених комбінацій

Далі наведено більш детальне дослідження розподілу навантаження для кожного розглянутого сервісу. Аналіз, що стосується лише користувачів FTP, показаний на рисунку 3.19, де можна ще побачити, що ці користувачі несуть відповідальність за більшу частину завантаження, створеного в мережі. Порівняно з попереднім аналізом високого навантаження, можна побачити збільшення стандартного відхилення, особливо в сценаріях 2 та 3, внаслідок низької кількості користувачів, які розглядаються. Крім того, слід помітити збільшення цих варіантів у різних сценаріях, що є наслідком зон покриття, пов'язаних з різними частотними діапазонами, доступними для кожного з них. Ще один важливий результат, який потрібно розглянути, полягає в тому, що високі частотні діапазони завжди містять більше навантаження, ніж інші, що слід очікувати на основі

алгоритму. Тільки сценарій 1 показує подібні навантаження для кожної ріднесучої через те, що існує зменшена кількість користувачів, і що діапазон частот 1800 МГц виявляється відповідальним за користувачів, які знаходяться далі від eNB, і тому не можуть підключитись до групи 2600 МГц. Це спостереження не так зрозуміло для Сценаріїв 2 і 3, оскільки діапазон 900 МГц має найменшу кількість RBi.

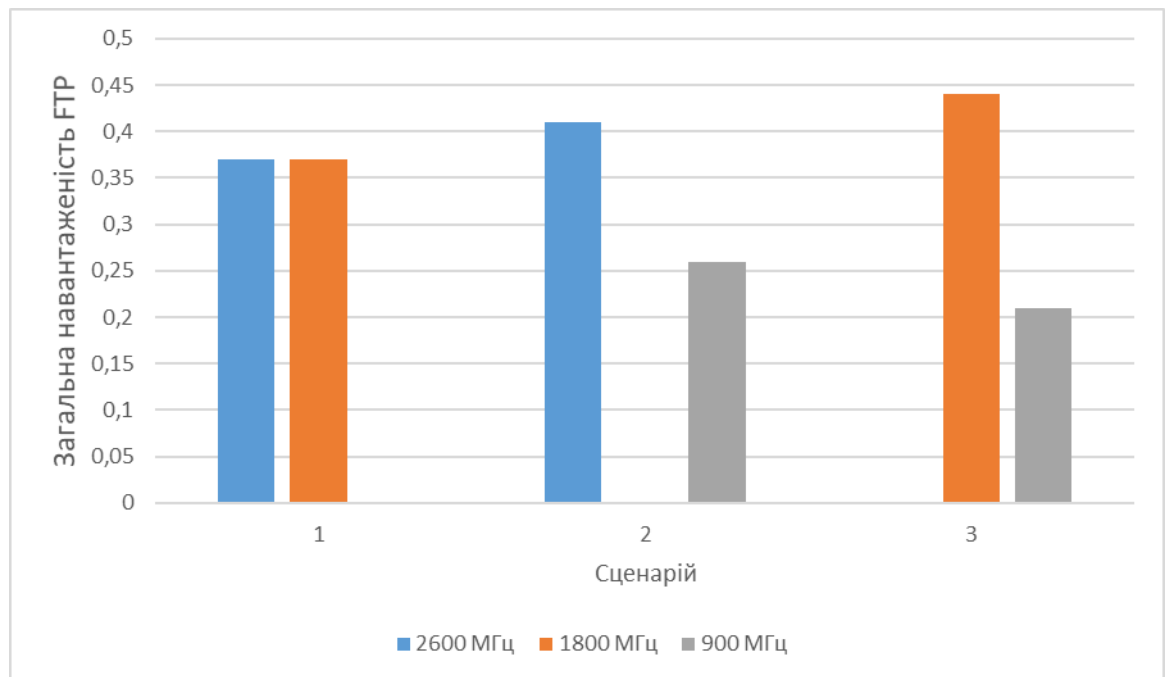


Рисунок 3.19. Розподіл навантаження для трьох визначених комбінацій для користувачів FTP.

Середні користувачі, які генерують VoLTE, генерують навантаження по всій мережі, представлені на рисунку 3.20. Можна знову зауважити, що ці користувачі, хоча вважаються більш пріоритетними і тому призначені для смуг високих частот, не займають багато мережесих ресурсів. Це зауваження ускладнюється низькою кількістю розглянутих користувачів.

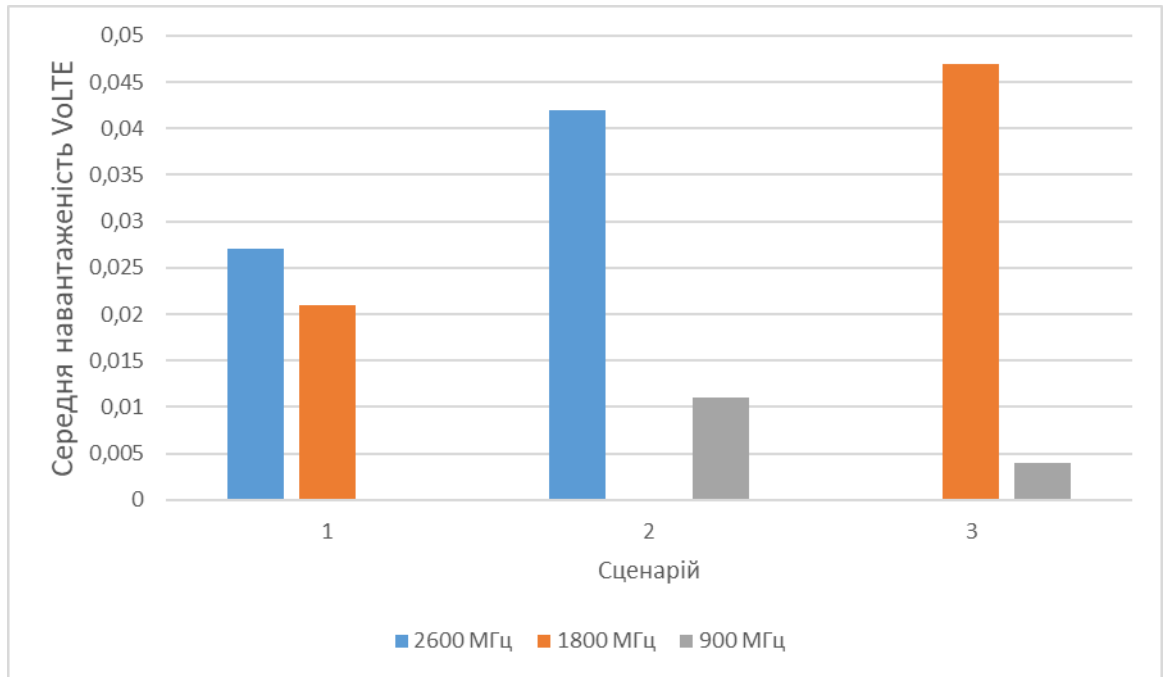


Рисунок 3.20 - Розподіл навантаження для трьох визначених комбінацій для користувачів VoLTE.

Кількість активних користувачів FTP та VoLTE представлена на рисунку 3.21, де можна спостерігати, що кількість користувачів VoLTE залишається незмінною для всіх сценаріїв, крім виявлення жодного стандартного відхилення. Це є результатом кількості генерованих користувачів, тобто VoLTE користувачі розглядаються по всій мережі у всіх моделюваннях, і в кінцевому підсумку вони можуть бути обслужені. Це результат, який відповідає очікуваному завдяки пріоритету, присвоєному цій службі. Крім того, можна побачити кількість активних FTP, що досягають вищих значень від сценарію 1 до сценарію 2, і знову від останнього до сценарію 3. Це є наслідком зростання зони покриття, пов'язаного з діапазонами частот, що розглядаються для кожного сценарію.

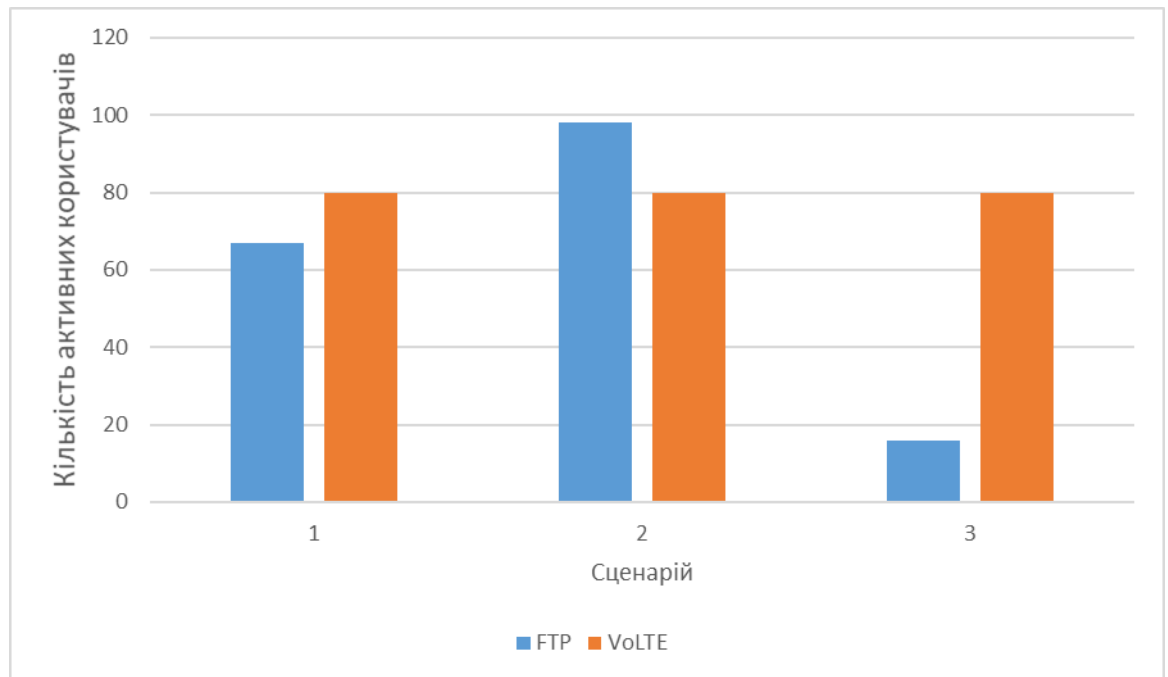


Рисунок 3.21 - Кількість активних користувачів за типами послуг для трьох визначених комбінацій

Також представлений аналіз кількості активних користувачів у кожному діапазоні частот за кожним сценарієм, однак отримані результати значно відрізняються від отриманих результатів у попередньому розділі, як показано на рисунку 3.22. Перше спостереження, яке потрібно зробити, полягає в тому, що загальна кількість розглянутих користувачів не відповідає кількості активних користувачів за кожним визначеним сценарієм. У сценарії 1 можна побачити, що кількість користувачів, призначених для смуги частот 2600 МГц, нижча, ніж очікувалося, пояснюється лише тим, що у всій мережі розглядається менше користувачів, а також через вплив випадкових процесів, що враховуються для необхідних розрахунків для рівнів якості сигналу, може мати таку величину. Цей результат призводить до присвоєння більшої кількості користувачів до 1800 МГц, крім тих, що знаходяться за межами зони покриття першого згаданого діапазону. Ця ситуація також повторюється в сценарії 2, де вплив більш широкої зони покриття діапазону 900 МГц

більш помітний. Тим не менше, сценарій 3 демонструє очікувану поведінку в тому сенсі, що, оскільки компроміс між зоною покриття стільникового зв'язку та кількістю доступних RB менш вираженим для діапазону 1800 МГц, більшість користувачів може бути виділена для цієї групи, оскільки він є найвищим пріоритетом для зазначеного сценарію.

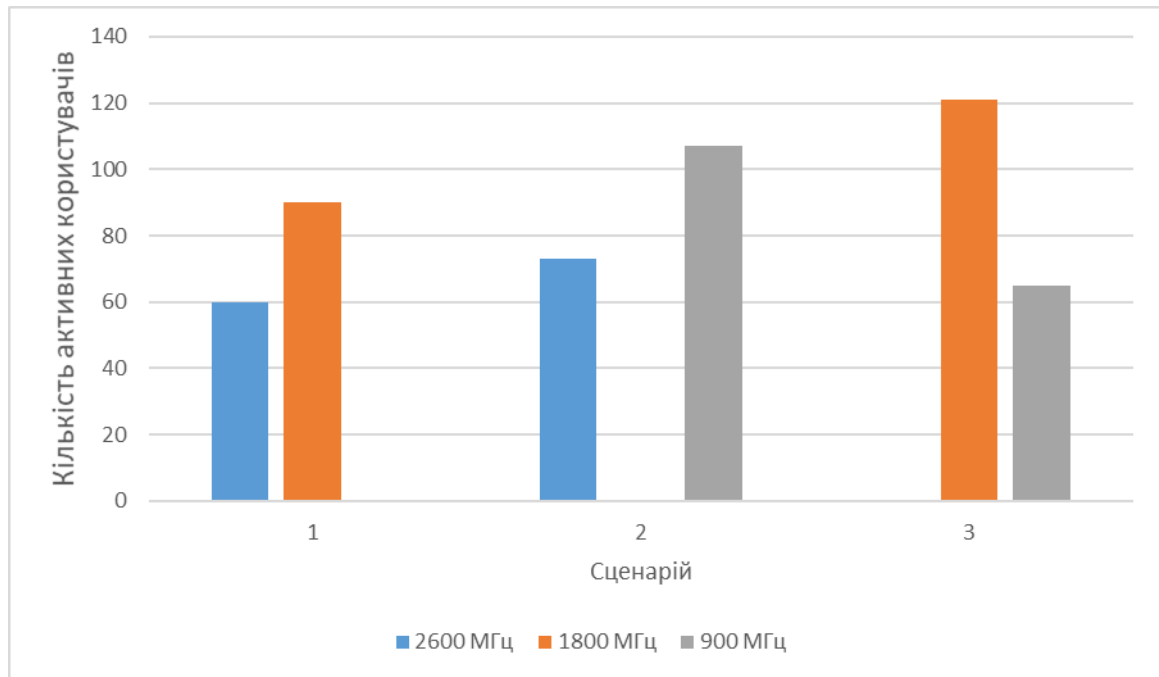


Рисунок 3.22 - Кількість активних користувачів за смугою частот для трьох визначених комбінацій

Далі, на рисунку 3.23 та 3.24 представлений аналіз отриманої потужності для служб FTP та VoLTE, відповідно.

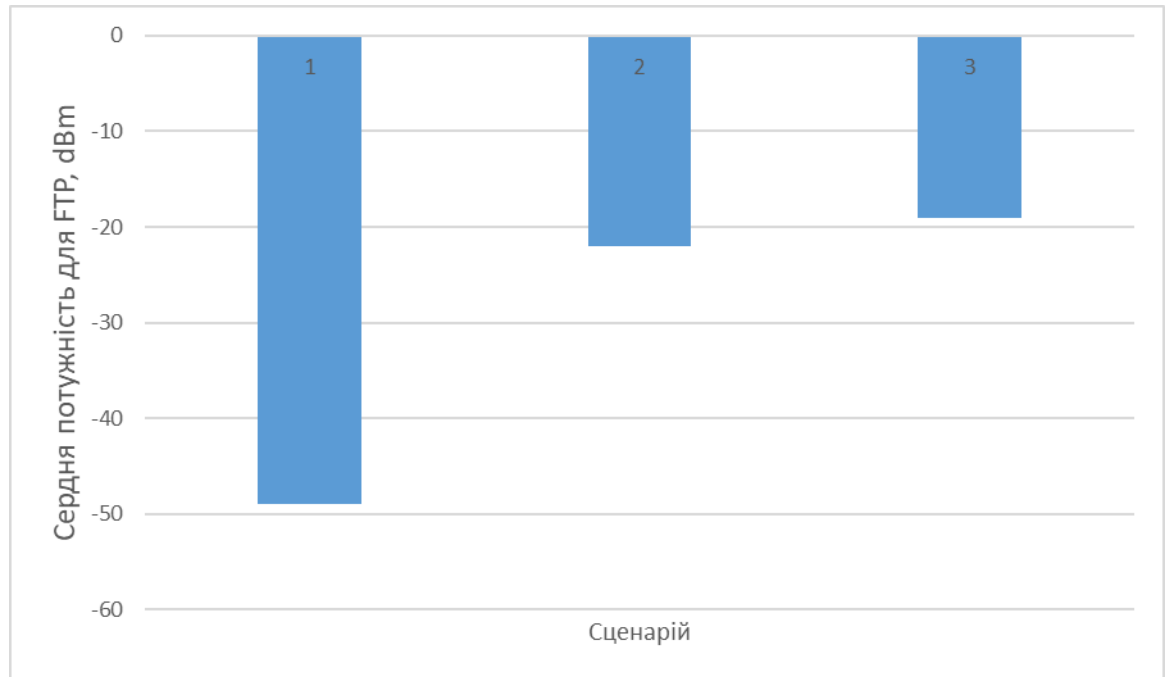


Рисунок 3.23 - Середні значення отриманої потужності для користувачів FTP для трьох визначених комбінацій

Як зазначалося в аналізі високої навантаження, тип використовуваного сервісу суттєво впливає на отриману потужність через кількість RBs, необхідних кожній службі, що виправдовує той факт, що цей параметр передбачає більш високі значення для служби FTP, порівняно з VoLTE. Тим не менше, для розрахунку цього параметра слід враховувати відстань від обслуговуючої антени та умов LoS UE. Іншим результатом, який слід спостерігати, є збільшення отриманої потужності від сценарію 1 до сценарію 2, а потім збільшення сценарію 3 щодо послуги FTP. Це є наслідком збільшення кількості активних користувачів FTP з кожного сценарію. Крім того, враховуючи, що загальна кількість розглянутих користувачів досить низька, чим більше RBs може бути виділено кожному активному користувачеві.

Що стосується отриманої потужності користувачів VoLTE, то можна помітити, що вона досягає більших значень, ніж у аналізі високого навантаження в результаті кількості розглянутих користувачів у всій

мережі. Проте сценарій 2 представляє трохи нижчі результати для цього значення, що є наслідком призначення багатьох користувачів VoLTE на смугу 900 МГц через їх відстань від обслуговуючої антени та, можливо, завдяки їх радіозв'язку.

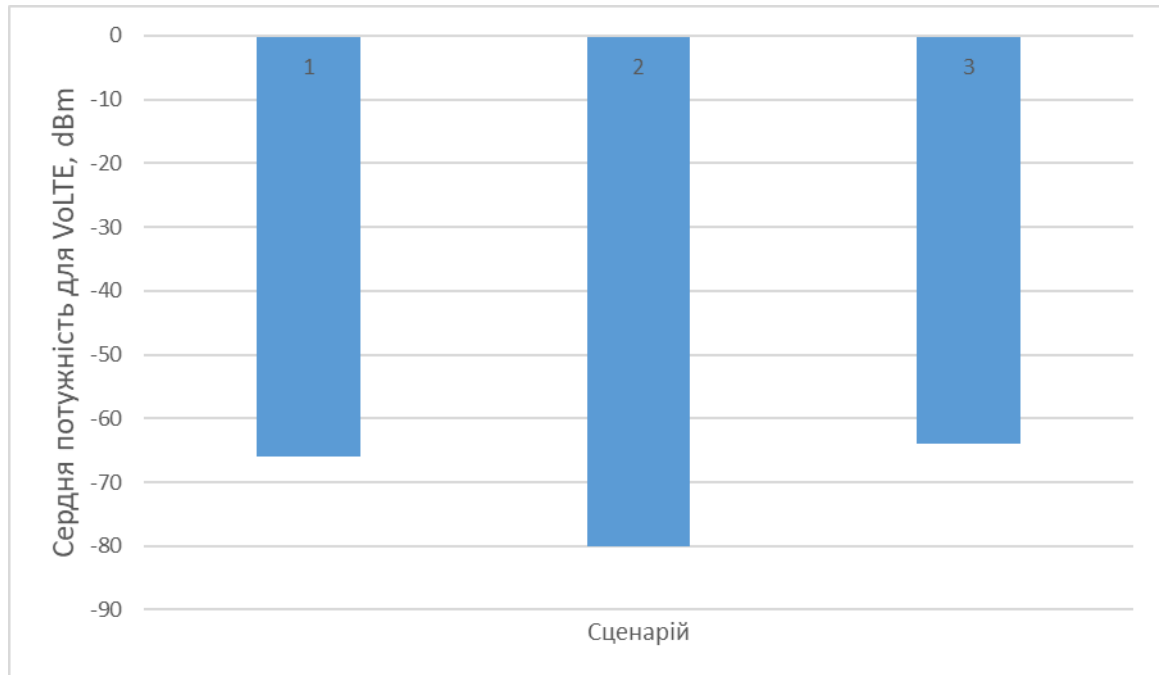


Рисунок 3.24 - Середня потужність для користувачів VoLTE для трьох визначених комбінацій

Останній аналіз відносно середньої потужності, що отримується, наведено на рисунку 3.25, який дозволяє подальше вивчення цього параметру з точки зору різних частотних діапазонів. Оскільки кількість користувачів, які розглядаються в цьому аналізі, становить лише 200, і, нагадуючи, що всі користувачі VoLTE обслуговуються, можна очікувати, що середня потужність, отримана в кожній смузі частот найвищого пріоритету, досягає дуже низьких значень. Також можна ще раз зрозуміти, що отримана потужність зростає від сценарію 1 до сценарію 2, а тим більше для сценарію 3, внаслідок збільшення числа користувачів FTP, які обслуговуються в кожному з сценаріїв. Більшість цих користувачів обслуговуються носіями з меншим пріоритетом в результаті реалізованого алгоритму, і тому можна спостерігати збільшення середньої прийнятої

потужності, особливо в сценарії 3, де можна побачити більшу різницю між середньою отриманою потужністю у кожній з розглянутих несучих.

Далі проводиться аналіз середнього SINR, який представлений на рисунку 3.26. Результати також узгоджуються з існуючим прямим зв'язком між цим параметром та середньою прийнятою потужністю, як це було для розділу 3.2, але різниця полягає в тому, що враховуються перешкоди та шум. Ці два останні фактори, як правило, мають менш виражений вплив у цьому аналізі низького навантаження, оскільки розглядається менше користувачів. Проте це не підтверджено настільки, на скільки очікувалося, головним чином, завдяки розміру мережі та завдяки згаданому вище відношенню з отриманою потужністю, яка сама по собі є дуже низькою, як зазначено вище.

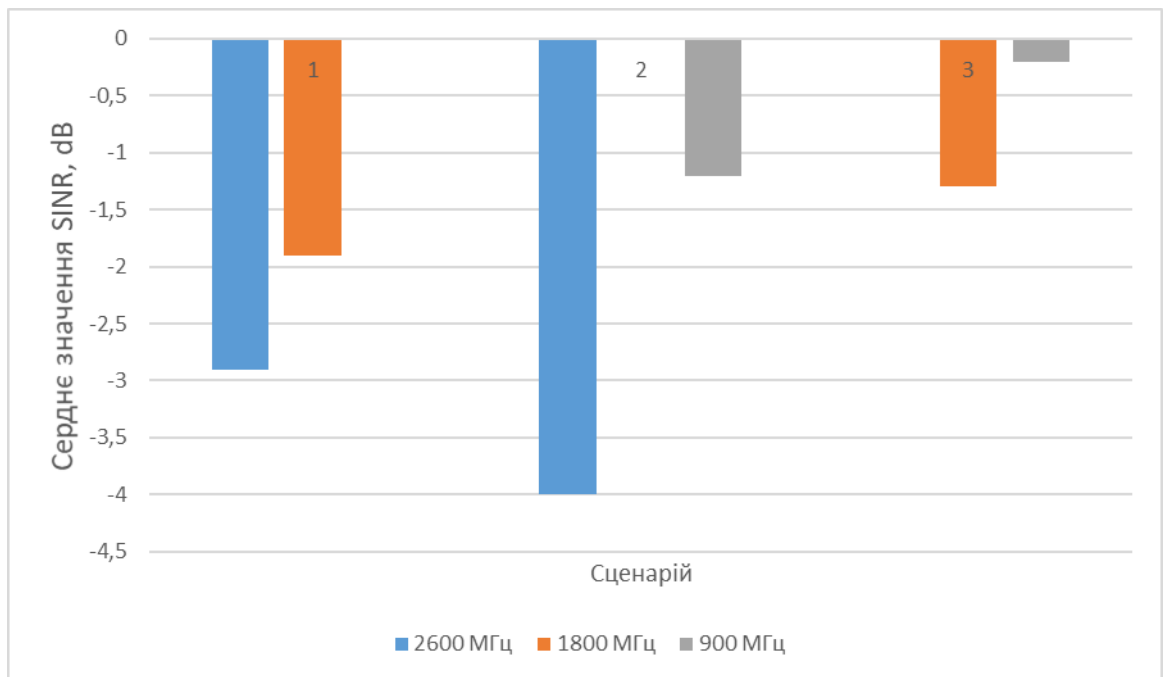


Рисунок 3.25 - Отримана потужність по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій

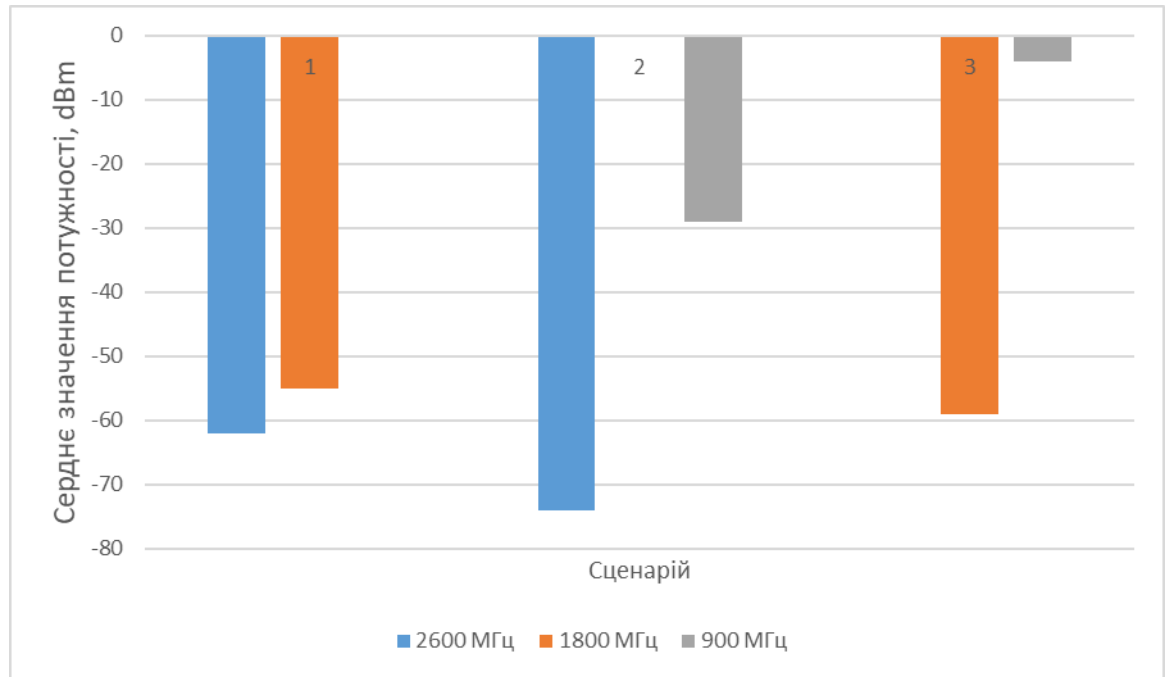


Рисунок 3.26 - Середня SINR по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій

На рисунку 3.27 та 3.28 також представлений середній аналіз SINR, але стосується послуг FTP та VoLTE, відповідно. Знову ж таки, можна підтвердити вплив середньої прийнятої потужності в отриманих результатах, що призводить до представлених низьких середніх значень SINR. Також, порівнюючи результати між кожною послугою, можна побачити, що користувачі FTP знову мають більш високі значення для цього параметра в порівнянні з користувачами VoLTE, як наслідок кількості RBs, необхідних кожній службі для задоволення своїх вимог з точки зору пропускної спроможності. Ще одне спостереження - це підтвердження збільшення середнього значення SINR для користувачів FTP із сценарію 1 до сценарію 2, а потім за сценарієм 3, як наслідок збільшення кількості користувачів для цього типу послуги.

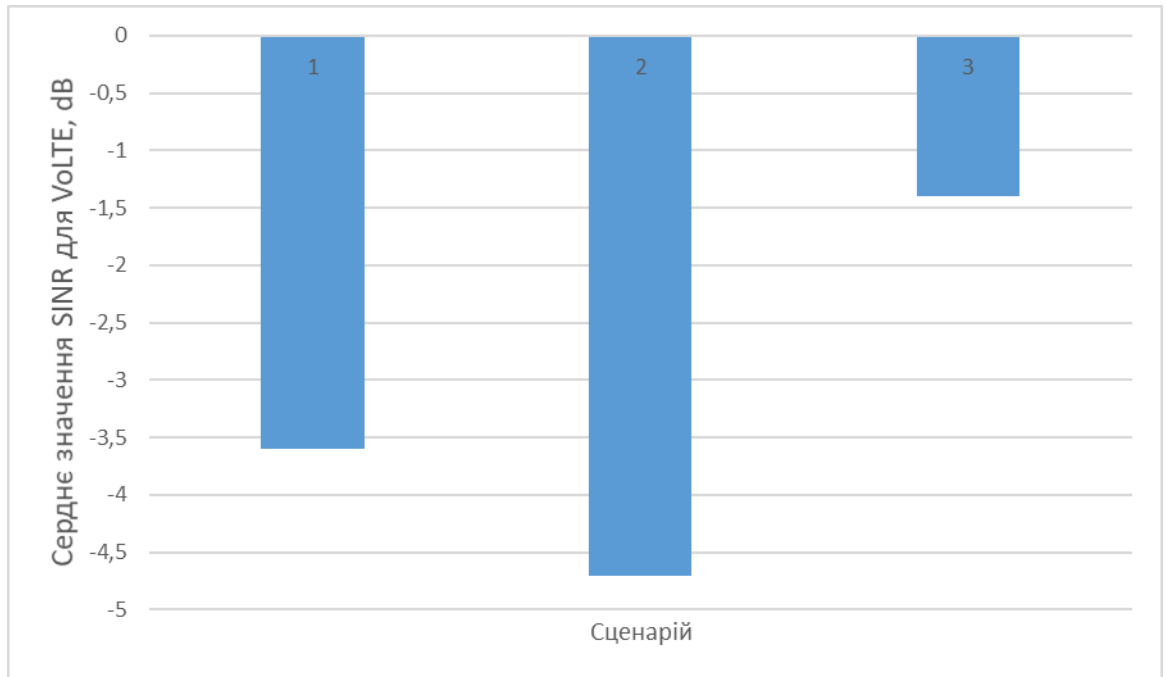


Рисунок 3.27 – Середнє значення SINR для користувачів VoLTE для трьох визначених комбінацій

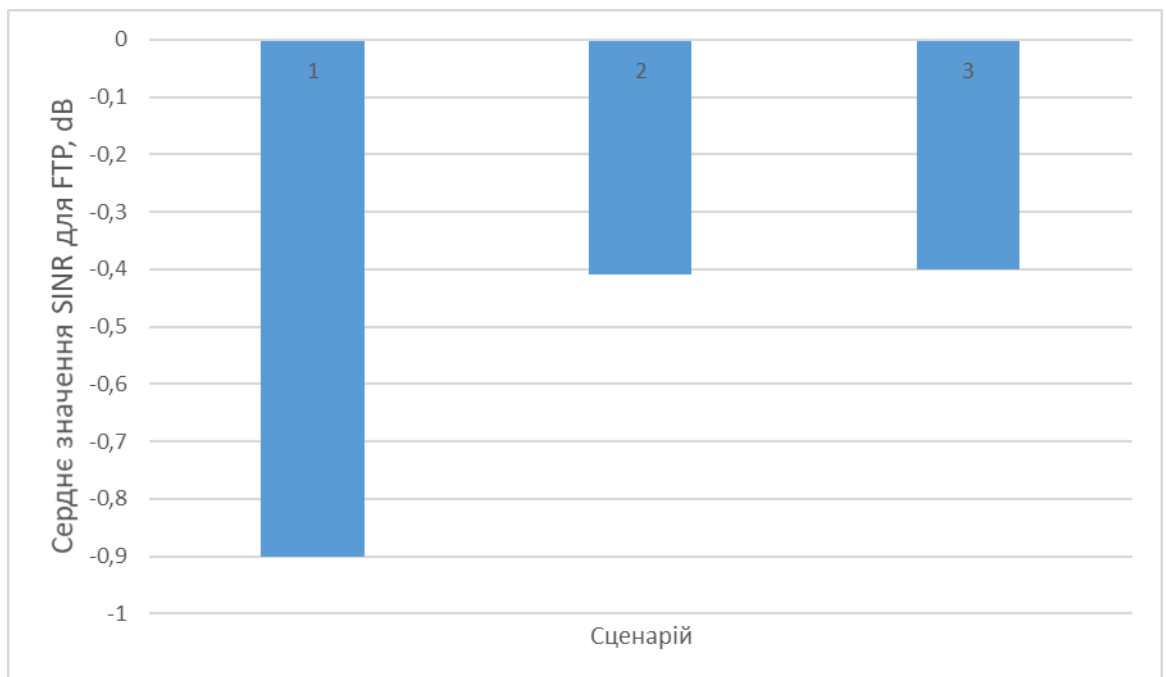


Рисунок 3.28 - Середня SINR для користувачів FTP для трьох визначених комбінацій

Наступним параметром для аналізу є середня досягнута пропускна спроможність. Як це було зроблено в попередньому розділі, лише

пропускна спроможність користувачів FTP представлена у цифровій формі з тих же причин, які викладені в аналізі високого навантаження. Крім того, середня досягнута пропускна спроможність для користувачів VoLTE також була вивчена, щоб підтвердити, що швидкість передачі даних дійсно знаходиться в діапазоні, визначеному для цього типу послуги.

Як видно з рисунка 3.29, середня пропускна спроможність для користувачів FTP досягає більших значень, ніж ті, що наведені в розділі 3.2, як очікується, через те, що менше користувачів запитують ресурси з мережі. Проте досягнуті показники даних все ще нижчі теоретично досяжних, що є наслідком реалізованого алгоритму, який виділяє пріоритетні смуги більш високих частот, перш ніж розподіляти доступні ресурси у нижчих пріоритетних смугах, що призводить до необхідності розділити наявні RBs серед пов'язаних користувачів. Також помітно, що кожна комбінація несучих призводить до різної досягнутої пропускної спроможності, оскільки число активних користувачів FTP зростає і кількість доступних ресурсів зменшується. Сценарій 1 містить найменшу кількість активних користувачів FTP та найбільш доступних RBs, і, таким чином, забезпечує більшу пропускну спроможність, але з більш високим стандартним відхиленням, потім Сценарій 2 і, нарешті, сценарієм 3. Ці результати співпадають з очікуванням.

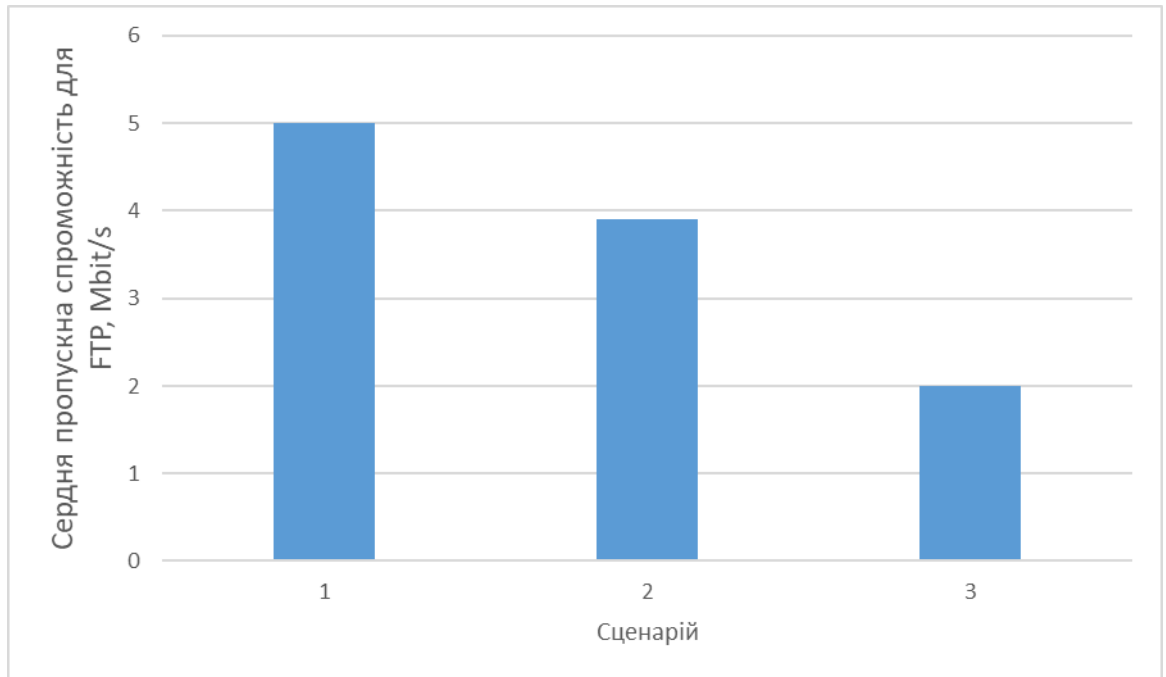


Рисунок 3.29 - Середня пропускна спроможність для користувачів FTP для трьох визначених комбінацій

Наступний аналіз стосується середньої кількості виділених RBs для користувачів FTP. З результатів дослідження, представлених на рисунку 3.30, можна спостерігати розподіл RBs для цих користувачів у кожному частотному діапазоні, а також можна перевірити, чи більші частотні діапазони призводять до збільшення середньої кількості ресурсів для підключених користувачів, як і очікувалося. Існує також чіткий зв'язок між досвідченими пропускними спроможностями цих користувачів із середньою кількістю виділених RBs для них, як це можна спостерігати, порівнюючи діаграму нижче з даними, представленими на рисунку 3.29.

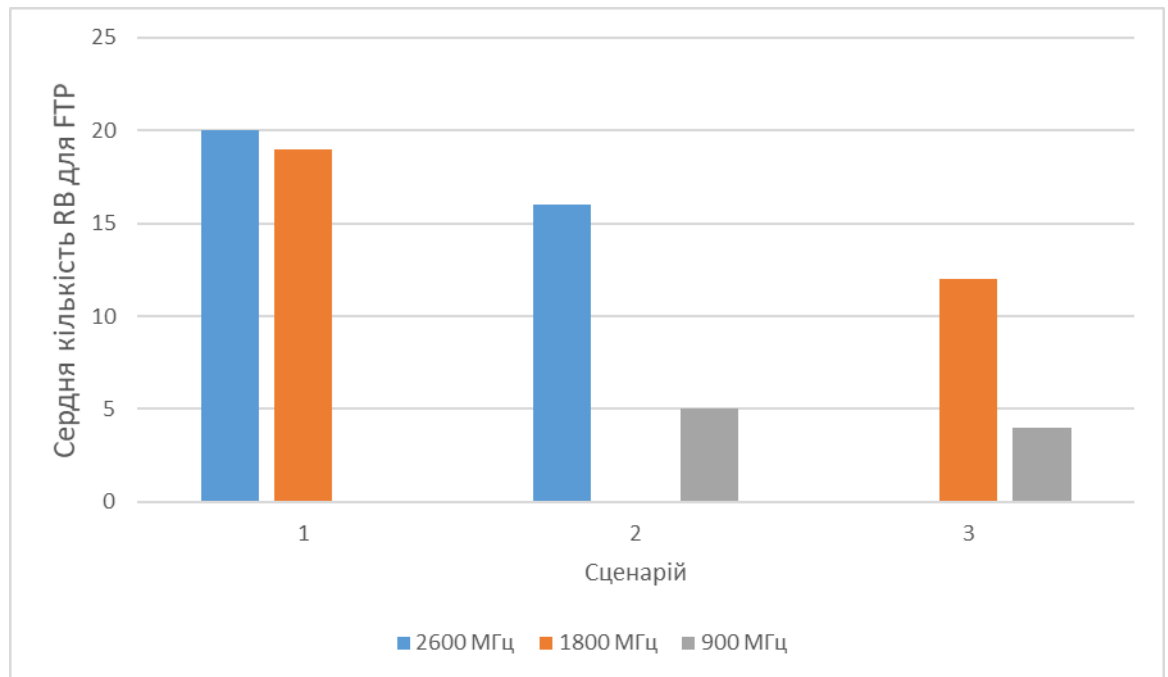


Рисунок 3.30 - Середня кількість виділених RBs для користувачів FTP у кожній смузі частот для трьох визначених комбінацій

Як було зазначено в попередньому розділі, дослідження середньої кількості виділених RBs для користувачів VoLTE не представлено, оскільки отримані результати є такими, як очікувалося, і не представляють великої доданої вартості для цієї роботи, оскільки кількість ресурсів, необхідних для задоволення вимоги такого типу користувача досить низька, починаючи від 1 до 2 RBs.

Останнє дослідження в цьому розділі призначене для порівняння середньої кількості виділених RBs для кожного типу послуг на кожний сектор, як це було зроблено в розділі 3.2. Рисунок 3.31 знову показує, що для трафіку VoLTE потрібна набагато менша кількість RBs, ніж еквівалент для користувачів FTP, з огляду на пропускну спроможність кожної служби. Також можна помітити, що кількість виділених RBs на сектор зменшується з урахуванням кількості доступних ресурсів, пов'язаних з пропускнуною спроможністю операторів, що означає, що сценарій 1 здатний забезпечити більше RBs, за яким слідує сценарій 2 і, нарешті, сценарій 3, як очікувалося від визначення кожного з сценаріїв.

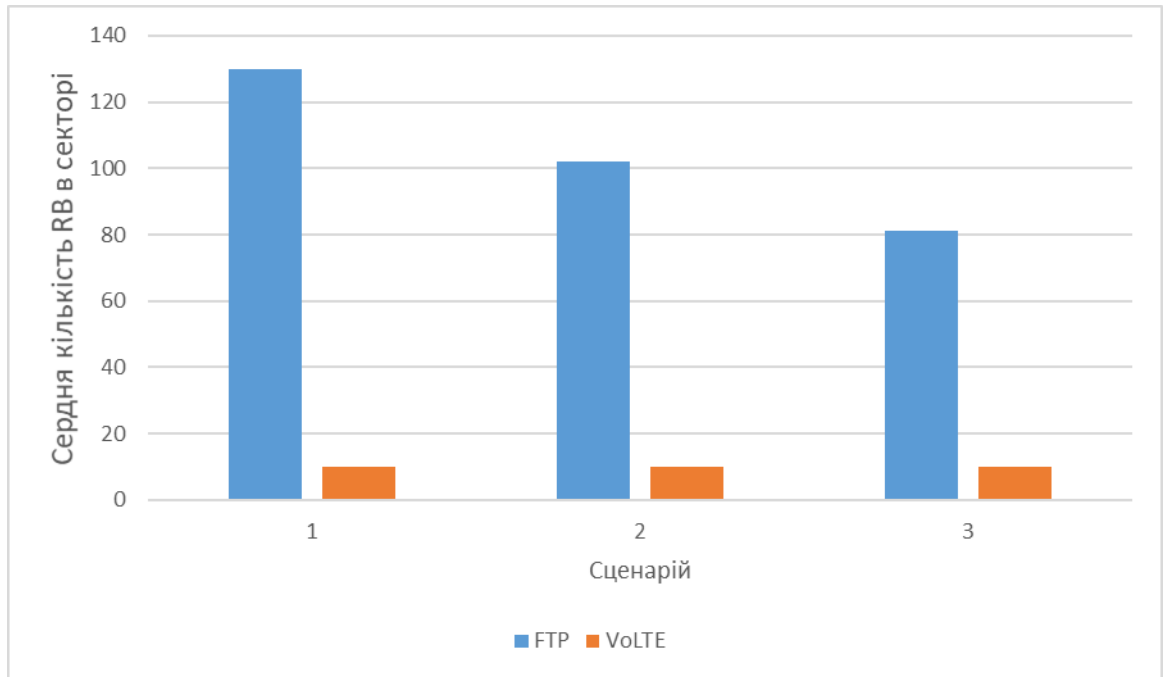


Рисунок 3.31 - Середня кількість виділених RBs у секторі за типом послуги, для трьох визначених комбінацій

3.4. Результати тестування в місті Київ

Оскільки не існує ідеального сценарію в мережі, для вивчення різних ситуацій було проведено тестування в декількох районах міста Київ, причому всі вони мають лише частоту 2600МГц. Розглядались сценарії при низькому, звичайному міському та надмірному навантаженнях.

Результати, отримані в результаті проведення тестів значно відрізнялися від тих, що представлені в симуляторі. Причини цих відмінностей перш за все полягають в наявності лише однієї частоти, доступної в місті Київ на сьогодні. Багато перешкод в місті не розглядаються в симуляторі, що може мати великий вплив на поширення сигналу від eNB до UE. Крім того, модель розповсюдження вважає, що всі будинки мають однакову висоту, а всі вулиці мають однакову ширину, що не можна сказати про місто. Іншим фактором, який може вплинути на отримані результати, є різниця в кількості користувачів та їх відповідного трафіку в секторі, в якому здійснювалися вимірювання, а це означає, що покриття обслуговуючого сектора, ймовірно, відрізнятиметься від того, що

розглядається в моделюванні. Також позиціонування eNBs та їх кількості секторів та орієнтації відповідних антен у всій мережі не відповідає точно тому, що існує в мережі Kyivstar. Крім того, у моделюванні не враховуються швидкі зміни сигналу, через погані радіопередачі або під час руху UE, оскільки симулятор розглядає тільки користувачів в тому ж географічному розташуванні.

Проведені тести при низькому та звичайному міському навантаженні на eNBs в точках, зазначених на рисунку 3.32. Оскільки максимальне навантаження на eNB складає до 1000 UE на частотах 2600 МГц, низьке навантаження передбачає кількість підключених пристроїв - 100-250, звичайне міське – 250-700.

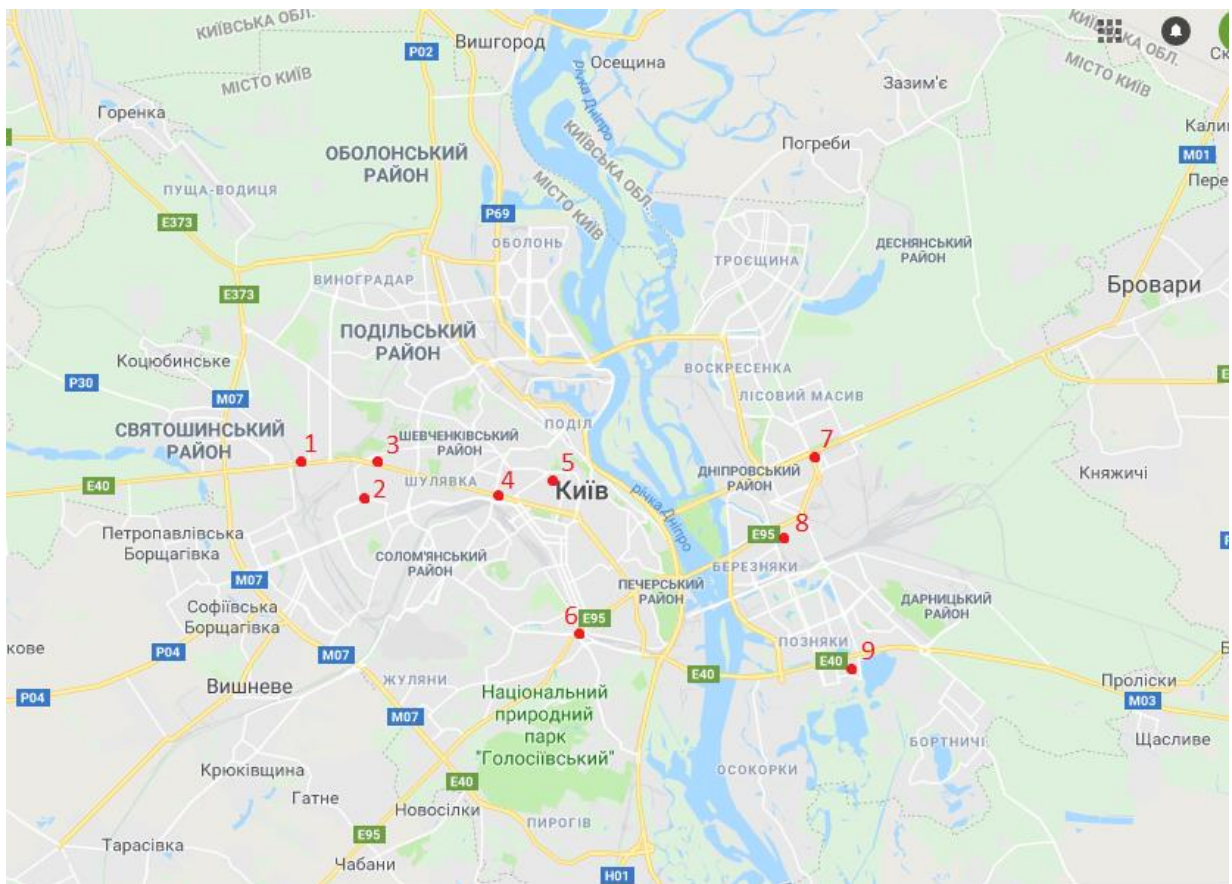


Рисунок 3.32 – Точки проведення тестування LTE 2600 МГц при низькому та звичайному міському навантаженні

Результати проведених тестів представлені в таблицях 3.3 та 3.4. Найкращий співвідношення показників швидкості були в точці 9 (район

Дарницької площі), і складала 1,16, найгірші в точці 1(район станції метро «Житомирська») – 3,27. В середньому показники швидкості при збільшенні навантаження на eNBs у вказаних точках зменшилось в 2,17.

Таблиця 3.3 – Показники спідтестів при низькому навантаженні на BS

№	DL(Мбіт/с)	UL(Мбіт/с)	Ping(мс)
1	95	29	15
2	73	16	18
3	169	69	13
4	97	10	19
5	80	18	17
6	82	32	18
7	98	20	15
8	101	15	16
9	71	8	18

Таблиця 3.4 – Показники спідтесту при звичайному міському навантаженні на BS

№	DL(Мбіт/с)	UL(Мбіт/с)	Ping(мс)
1	29	12	20
2	39	9	21
3	53	25	13
4	50	6	26
5	43	5	32
6	44	4	29
7	36	13	14
8	59	13	13
9	61	15	17

Надмірне навантаження на eNB передбачає підключення понад 1000 UE. Результати тестів (таблиця 3.5), що проводились при надмірному навантаженні (у т.з. години пік) у вказаних точках на рисунку 3.33 показали, що показники відрізняються наступним чином:

1. Точка 1(ГО ПрАТ «Київстар»): знизилась лише у 1,2 рази. Причина полягає в розташуванні двох eNBs, які збалансовують навантаження.
2. Точка 3(Центральний Залізничний Вокзал): майже не відрізняється від показників в точці 1, адже кількість обслуговуючих eNBs – 4, порівняння з попередніми прикладами не є доцільним, оскільки в даній навантаження завжди надмірне.
3. Точка 2(вул. Хрещатик) і точка 4(ТРЦ «Ocean Plaza»): показники знизилась в понад 3 рази порівняно зі звичайним міським навантаженням. Це пояснюється тим, що кількість базових станцій не покриває потреб користувачів. Зокрема в точці 4 eNB є лише одна, що призводить до втрати сигналу LTE і переключення на HSPA.

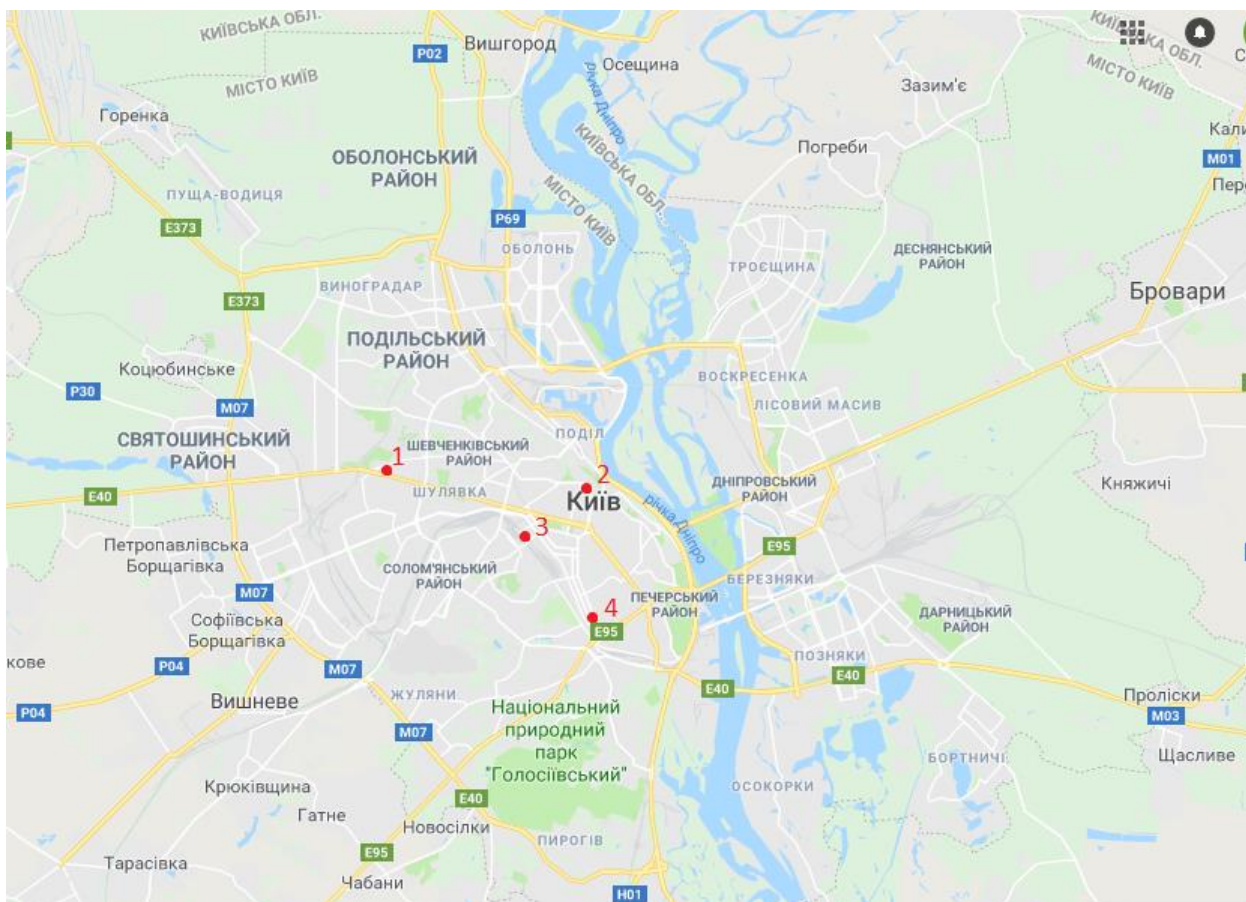


Рисунок 3.33 – Точки проведення тестування LTE 2600 МГц при надмірному навантаженні

Таблиця 3.5 – Показники швидкості при надмірному навантаженні на БС

№	DL(Мбіт/с)	UL(Мбіт/с)	Ping(мс)
1	48	13	20
2	17	2	28
3	47	3	24
4	11	5	15

Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано роботу мобільної мережі LTE з використанням методу інтерчастотного хендоверу на частотах 900МГц, 1800МГц та 2600МГц для трьох сценаріїв та при високо та низько навантаженій мережі та виявлено, що розроблений алгоритм є більш ефективним для високо навантаженої мережі, оскільки в такому випадку доцільним є врахування пріоритетності послуг і смуг частот.

2. Результати аналізу показали, що

а) модель сценарію 1 більш придатна для областей з високою щільністю користувачів із високими вимогами до швидкості передачі даних, оскільки більша частина користувачів може підключитися до мережі та мати достатньо високу пропускну спроможність.

б) сценарій 3 більше підходить для областей, де щільність користувачів є високою, але вимоги до швидкості передачі даних нижчі.

в) встановлена модель є більш ефективною, якщо її реалізувати в конкретній ситуації з високою щільністю користувачів, в якій розглядаються користувачі, що можуть мати високі або низькі вимоги до пропускну спроможності, які постійно потребуються ресурси з мережі.

ВИСНОВКИ

Трафік в мобільних мережах зростає з майже експоненціальною швидкістю, тому питання балансування навантаження в таких мережах є актуальних, враховуючи впровадження в місті Київ мережі LTE.

1. Проаналізовані існуючі методи балансування навантаження в мережах 3G та 4G та виявлено, що існуючі способи не враховують вимоги QoS та орієнтовані на балансування навантаження в одній частотній смузі, що суперечить сучасним вимогам мережі LTE.

2. Розроблений метод балансування навантаження за допомогою міжчастотного хендоверу, який відрізняється від існуючих використанням декількох частотних смуг, що призводить до більшої ефективності роботи мережі з точки зору часу відповіді, відношення заблокованих запитів до загальної кількості отриманих запитів, вимог QoS.

3. Запропонований метод протестований на трьох сценаріях за допомогою середовища моделювання та виявлено, що поєднання 2600 МГц з діапазонами частот 1800 МГц є доцільним для ділок мережі, де щільність користувачів і їх вимоги до якості надання послуг є високими. В той час коли поєднання діапазонів частот 1800 МГц та 900 МГц більш доцільно використовувати там, де щільність користувачів велика, але їх вимоги до мережі нижчі.

4. Виявлено, що на сьогодні мережа LTE в місті Київ реалізована тільки на частотній смузі 2600МГц. В липні 2018 року планується запуск 4G на частоті 1800МГц. Таким чином, постає питання балансування навантаження на різних частотних смугах.

5. Вимірювання в місті Київ показали, що трафік LTE значно збільшується з поширенням мережі по районах міста, тому розгортання кількох несучих частот є важливим напрямком роботи мобільних операторів, що повинно відповідати вимогам користувачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Холма Г. LTE для UMTS: Еволюція до LTE-Advanced / Холма Г., Тоскала А. - Великобританія, 2011р.
2. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper. - Feb. 2017
3. 3GPP, LTE, <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. - Dec. 2013
4. 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 11), ETSI TS, No. 36.211, Ver. 11.4.0. - Oct. 2013 (<http://www.3gpp.org>).
5. 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 11), ETSI TS, No. 36.331, Ver. 11.6.0. - Jan. 2014 (<http://www.3gpp.org>).
6. Correia, L. Системи мобільних комунікацій, Приклади лекцій / Instituto Superior Técnico. - Лісабон, Португалія. - 2013 рік.
7. 3GPP, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (Release 11), ETSI TS, No. 23.107, Ver. 11.0.0. - Nov. 2012
8. 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 11), ETSI TS, No. 36.101, Ver. 1.6.0. - Oct. 2013 (<http://www.3gpp.org>).
9. 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (Release 11), ETSI TS, No. 36.133, Ver. 11.6.0. - Oct. 2013 (<http://www.3gpp.org>).
10. 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description (Release 11), ETSI TS, No. 36.300, Ver. 11.8.0. - Jan. 2014 (<http://www.3gpp.org>)

11. 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode (Release 11), ETSI TS, No. 36.304, Ver. 11.6.0. - Jan. 2014 (<http://www.3gpp.org>).
12. 3GPP, LTE, Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 11), ETSI TR, No. 36.913, Ver. 11.0.0. - Nov. 2012 (<http://www.3gpp.org>).
13. Cox, C. An Introduction to LTE – LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. - Wiley, Chichester, United Kingdom. - 2012.
14. Martins, J., Impact of MIMO and Carrier Aggregation in LTE-Advanced, M.Sc. Thesis. - Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. - Oct. 2013.
15. Falcão, J., Inter-Cell Interferences in LTE Radio Networks, M.Sc. Thesis. - Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. - Oct. 2013.
16. Yagyu, K. Investigation on Mobility Management for Carrier Aggregation in LTE-Advanced / K. Yagyu, T. Nakamori, H. Ishii, H. Iwamura, N. Miki // VTC Fall 2011 – 73rd IEEE Vehicular Technology Conference. - California, USA. - Sep. 2011.
17. Wang, Y. Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems / Y. Wang, K. Pedersen, T. Sørensen, P. Mogensen // IEEE Transactions on wireless communications, Vol. 9, No. 5. - May 2010. - pp. 1780-1789.
18. Li, Z. Joint optimization on load balancing and network load in 3GPP LTE multi-cell Networks / Z. Li, H. Wang, Z. Pan, N. Liu, X. You // WCSP 2011 - International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing. - China. - Nov. 2011.
19. Lobinger, A. Load balancing in downlink LTE SelfOptimizing Networks / A. Lobinger, S. Stefanski, T. Jansen, I. Balan // VTC Spring 2010 – 71st IEEE Vehicular Technology Conference. - Taipei, China. - May 2010.

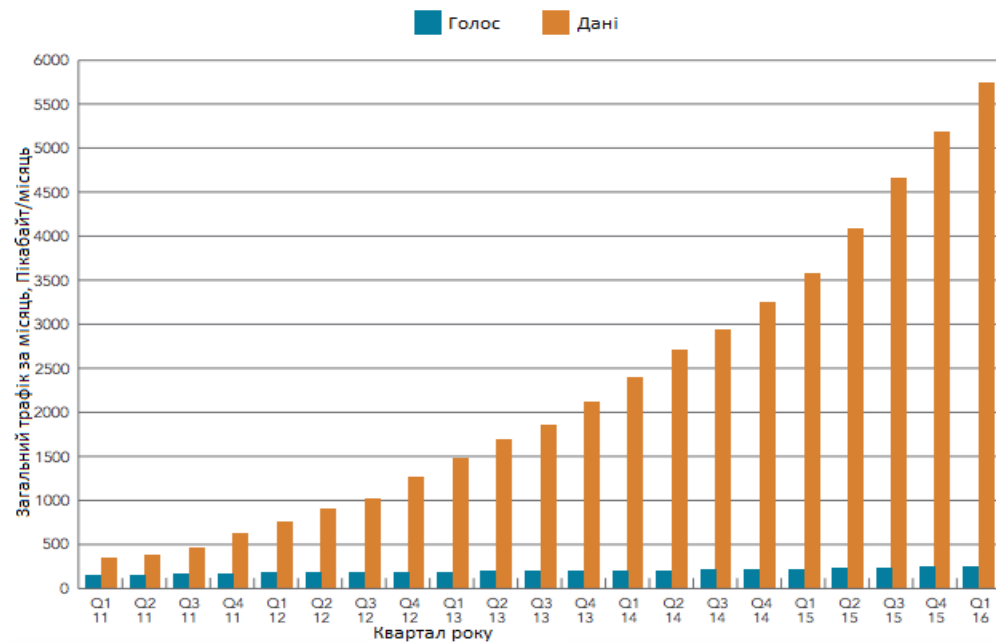
20. Kurjenniemi, J. Suitability of RSRQ Measurement for Quality Based Inter-Frequency Handover in LTE / J. Kurjenniemi, T. Henttonen, J. Kaikkonen // ISWCS '08 - IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems . - Reykjavik, Iceland. - Oct. 2008.
21. Kazmi, M. Evaluation of InterFrequency Quality Handover Criteria in E-UTRAN / M. Kazmi, O. Sjöbergh, W. Müller, J. Wiorek, B. Lindoff // VTC Spring 2009 - 69th IEEE Vehicular Technology Conference. - Barcelona, Spain. - Apr. 2009.
22. Almeida, D. Inter-Cell Interference Impact on LTE Performance in Urban Scenarios, M.Sc. Thesis, Instituto Superior Técnico. - Lisbon, Portugal. - Oct. 2013.
23. Sesia, S. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice (2nd Edition) / S. Sesia, I. Toufik, I. Baker // John Wiley & Sons. - Chichester, UK. - Aug. 2011.
24. 3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE coverage enhancements (Release 11), ETSI TR, No. 36.824, Ver. 11.0.0. - Jun. 2012 (<http://www.3gpp.org>).
25. Poikselka, M. Voice over LTE (VoLTE) / Poikselka, M., Holma, H., Hongisto, J., Kallio, J., and Toskala, A. - Chichester - Feb. 2012.
26. Орлова М. Інтелектуальний аналіз даних в хмарних інфраструктурах / М. Орлова, Є. Дзицюк, Є. Багінський: матеріали 8-ої міжнар. наук.-техн. конф. ПМК'2016, 20-22 кві 2016, Київ, Україна / НТУУ «КПІ», Ф-т прикладної матем. - К., 2016. - 345с. - Парал. тит. арк. англ.
27. Багінський Є. Оптимізація балансування навантаження в стільникових мережах LTE/LTE-A / Є. Багінський, М. Орлова: матеріали 10-ої міжнар. наук.-техн. конф. ПМК`2018, 21-23 бер. 2018, Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», Ф-т прикладної матем. – К., 2018. – С. 88 – 91.

- 28.Багінський Є. Data mining в хмарних сховищах / Є. Багінський: матеріали 9-ї міжнар. наук.-практ. конф. Сучасна наука: теорія і практика, 24-25 чер. 2016, Київ, Україна / Інститут освітньої і молодіжної політики – К., 2016. – С. 175 – 179
- 29.Багінський Є. Модифікація алгоритму балансування навантаження в мережах LTE/LTE-A / Є. Багінський, М. Орлова // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». – 2018. - №5

ДОДАТКИ

Додаток 1. Копії графічних матеріалів

Огляд мобільних мереж



Глобальний трафік в мобільних мережах, 2011-2016 роки

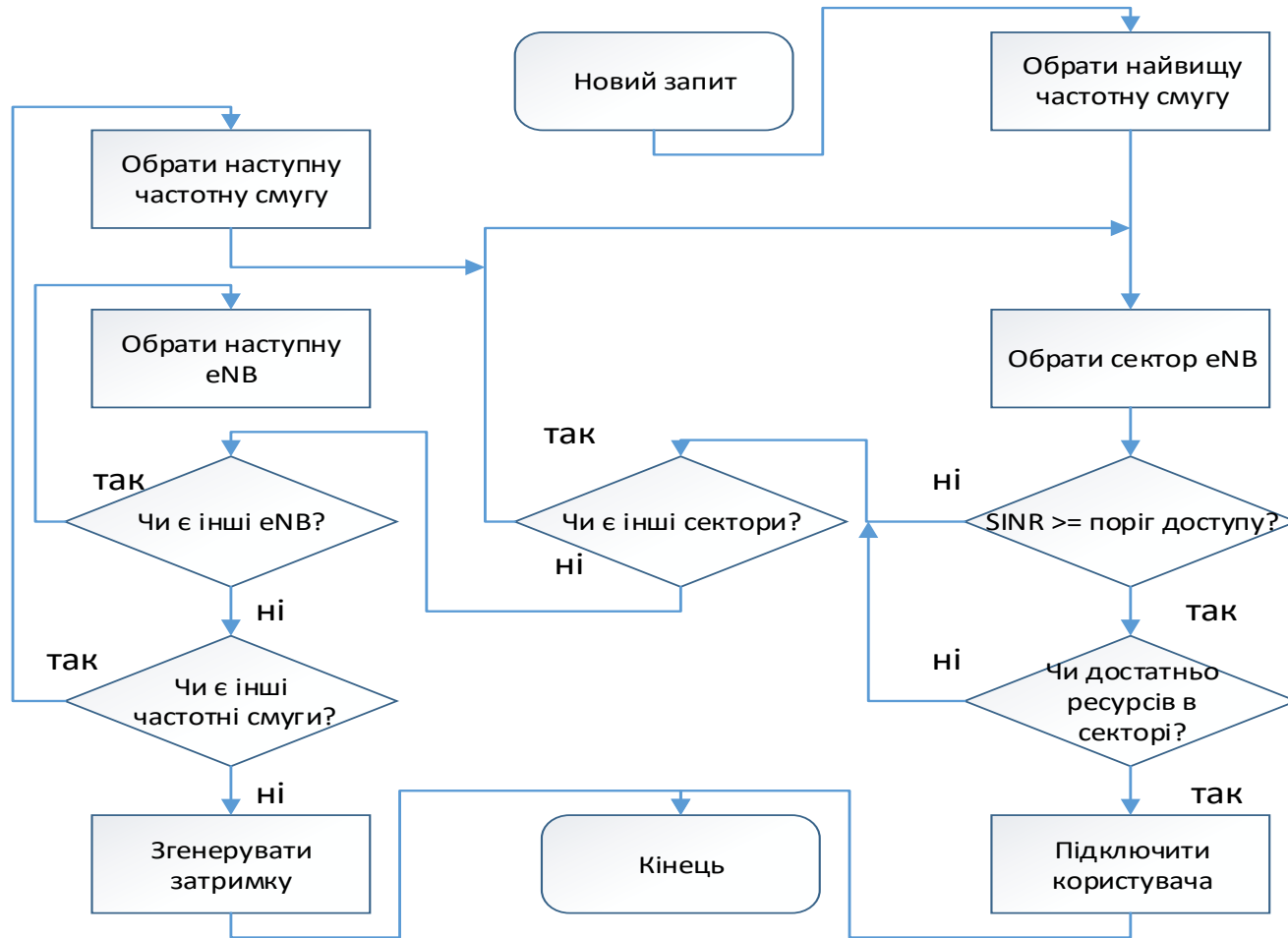


Глобальний прогноз мобільного трафіку, 2016-2021

Багінський Є.С.

Група KB-61м

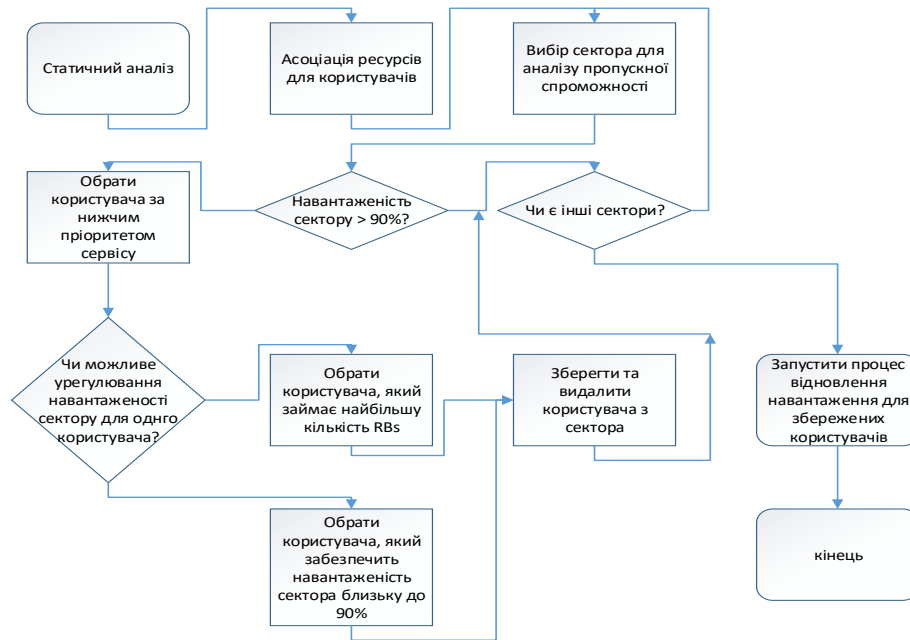
Запропонований алгоритм прийому вхідних сигналів



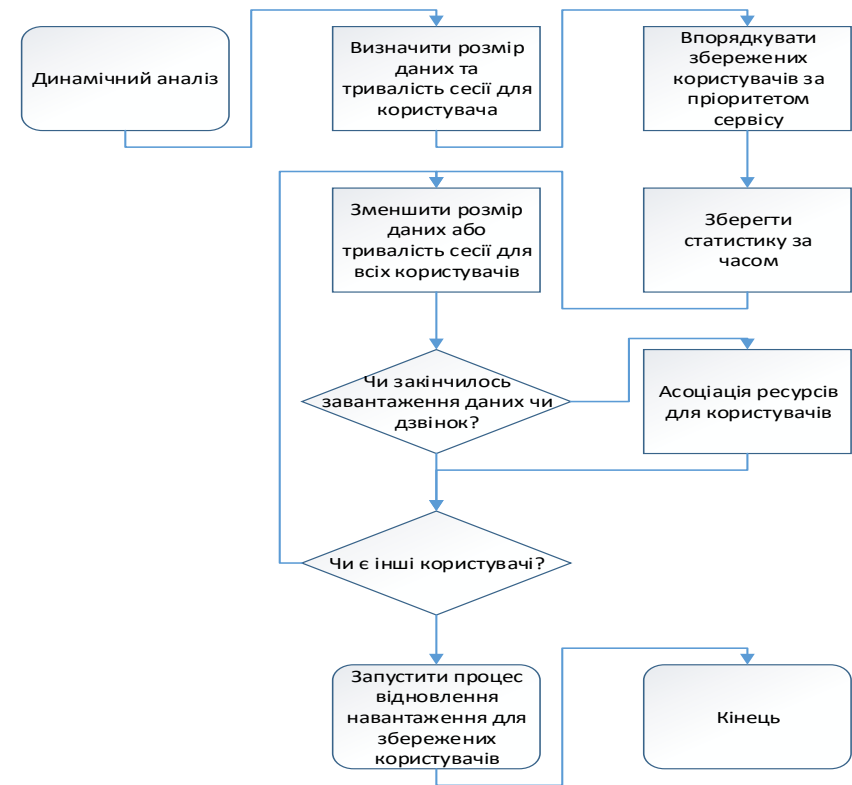
Багінський Є.С.

Група KB-61

Процес аналізу вхідних запитів



Процес статистичного аналізу

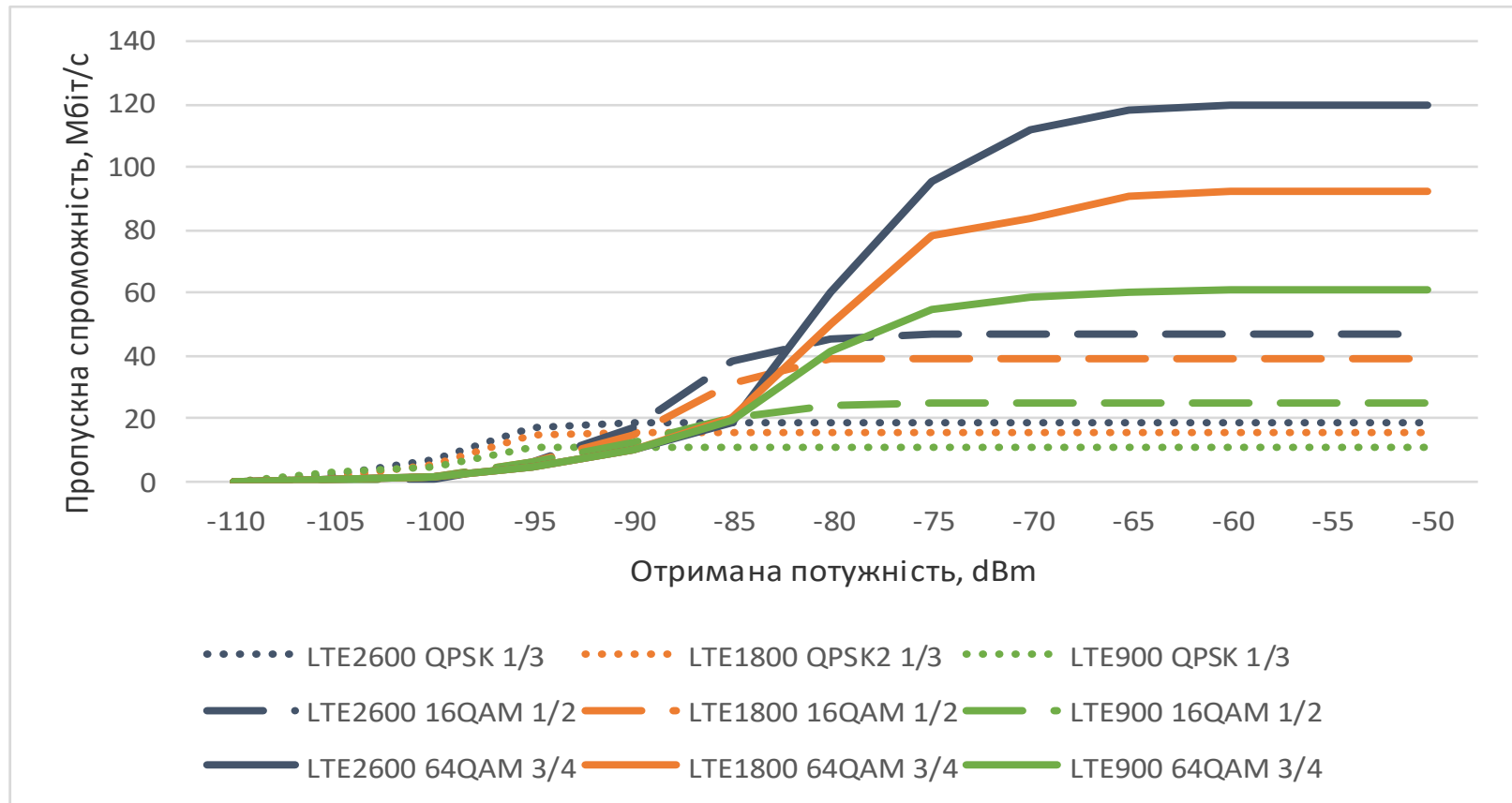


Процес динамічного аналізу

Багінський Є.С.

Група КВ-61м

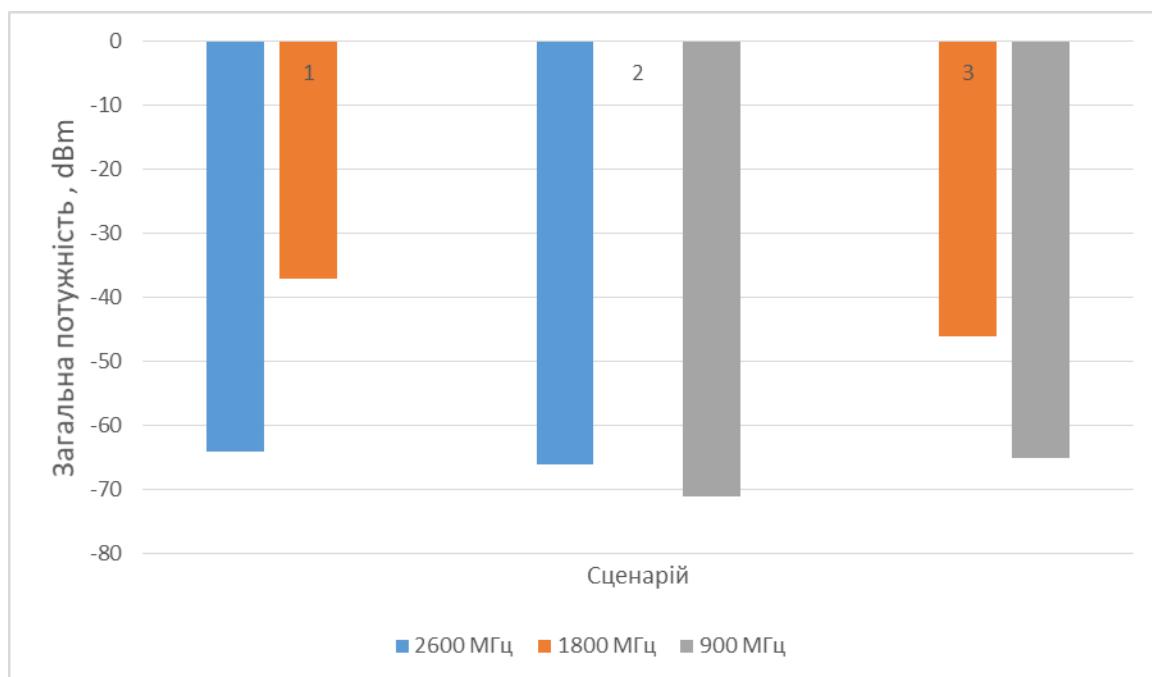
Пропускна спроможність та прийнята потужність за різними схемами модуляції та кодування



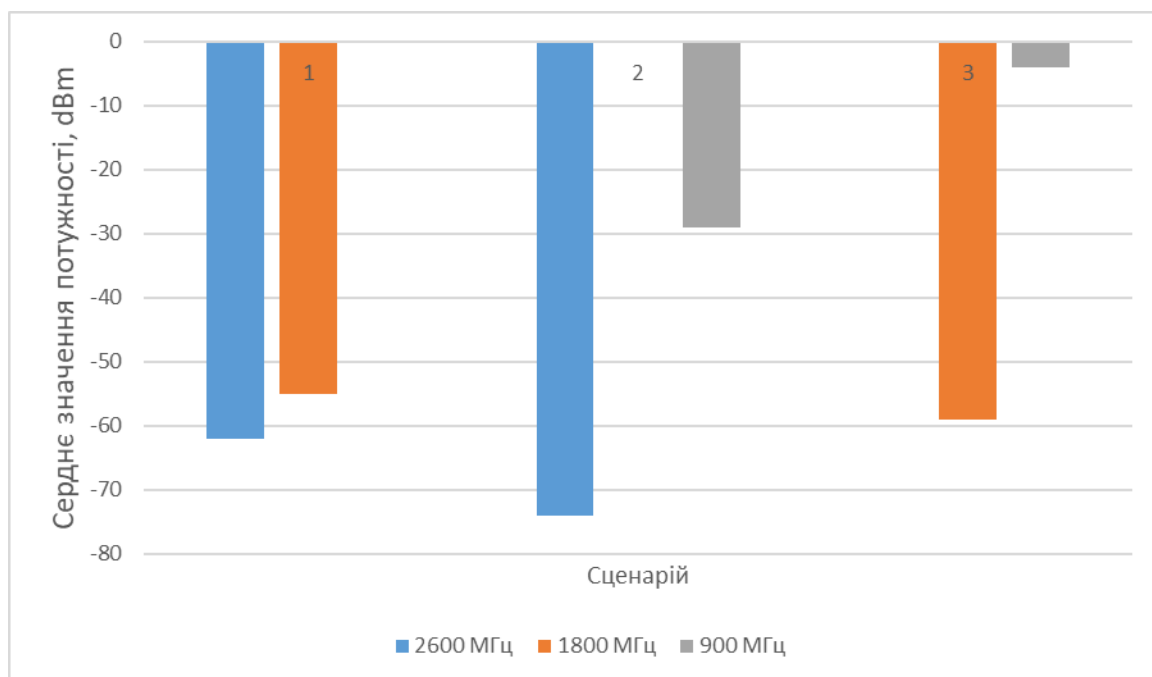
Багінський Є.С.

Група КВ-61м

Отримана потужність по частотному діапазону для трьох визначених комбінацій



В ситуації з високим рівнем навантаження

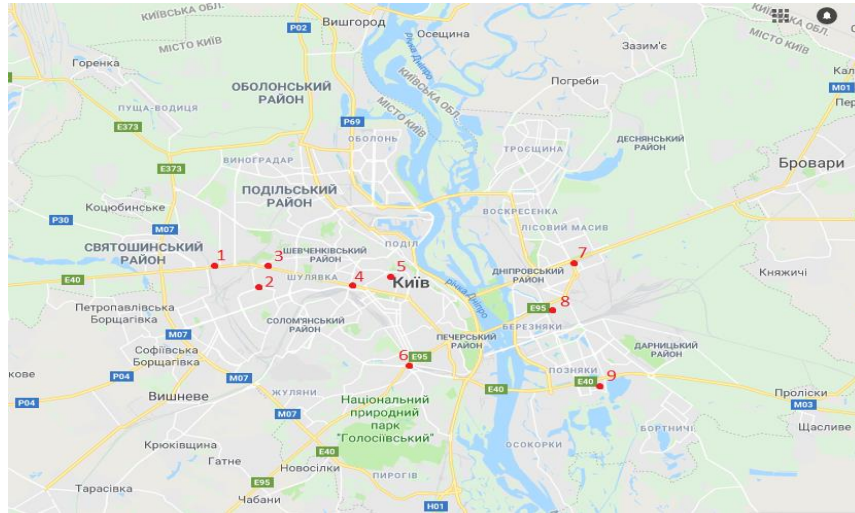


В ситуації з низьким рівнем навантаження

Багінський Є.С.

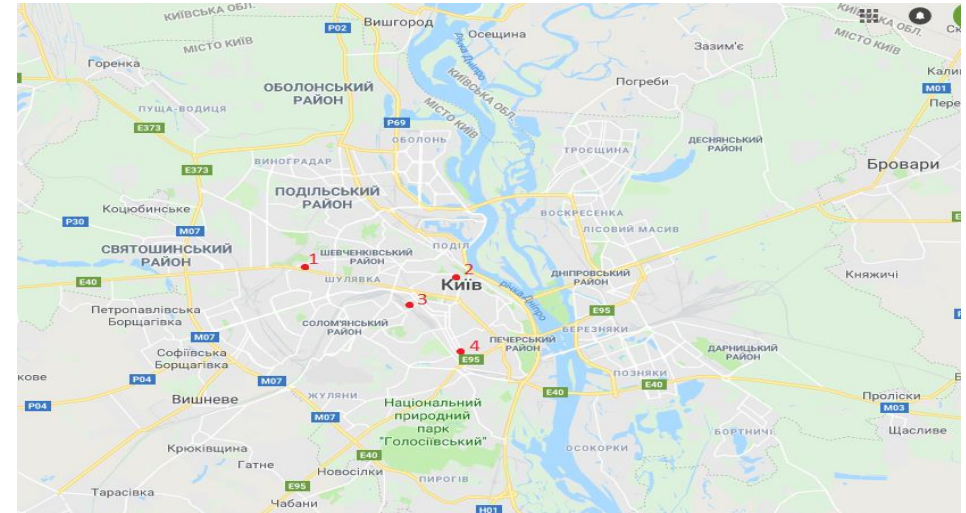
Група КВ-61м

Тестування LTE 2600 МГц



При низькому навантаженні

№	DL(Мбіт/с)	UL(Мбіт/с)	Ping(мс)
1	95	29	15
2	73	16	18
3	169	69	13
4	97	10	19
5	80	18	17
6	82	32	18
7	98	20	15
8	101	15	16
9	71	8	18



При високому навантаженні

№	DL(Мбіт/с)	UL(Мбіт/с)	Ping(мс)
1	48	13	20
2	17	2	28
3	47	3	24
4	11	5	15

Багінський Є.С.

Група KB-61м

Додаток 2. Публікації за темою магістерської дисертації